



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

“PROTOTIPADO Y CONSTRUCCIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN EN 3D DE UN BRAZO INALÁMBRICO PARA PROCESOS INDUSTRIALES DE ALTO RIESGO”

**GARRIDO JARAMILLO SANTIAGO JAVIER
VILLA TUQUINGA EDUARDO PAÚL**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO INDUSTRIAL

**RIOBAMBA – ECUADOR
2016**

CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS

2015-03-12

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

GARRIDO JARAMILLO SANTIAGO JAVIER
VILLA TUQUINGA EDUARDO PAÚL

Titulada:

“PROTOTIPADO Y CONSTRUCCIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN EN 3D DE
UN BRAZO INALÁMBRICO PARA PROCESOS INDUSTRIALES DE ALTO
RIESGO”

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

INGENIERO INDUSTRIAL

Ing. Marco Santillán Gallegos
DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

Ing. Carlos Santillán Mariño
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Jhonny Orozco Ramos
ASESOR DE TESIS

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: GARRIDO JAMARILLO SANTIAGO JAVIER

TÍTULO DE LA TESIS: “PROTOTIPADO Y CONSTRUCCIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN EN 3D DE UN BRAZO INALÁMBRICO PARA PROCESOS INDUSTRIALES DE ALTO RIESGO”

Fecha de Examinación: 2016-01-26

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Marcelo Jácome Valdez PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Carlos Santillán Mariño DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Jhonny Orozco Ramos ASESOR DE TESIS			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Marcelo Jácome Valdez
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

NOMBRE DEL ESTUDIANTE: VILLA TUQUINGA EDUARDO PAÜL

TÍTULO DE LA TESIS: “**PROTOTIPADO Y CONSTRUCCIÓN MEDIANTE IMPRESIÓN EN 3D DE UN BRAZO INALÁMBRICO PARA PROCESOS INDUSTRIALES DE ALTO RIESGO**”

Fecha de Examinación: 2016-01-26

RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. Marcelo Jácome Valdez PRESIDENTE TRIB. DEFENSA			
Ing. Carlos Santillán Mariño DIRECTOR DE TESIS			
Ing. Jhonny Orozco Ramos ASESOR DE TESIS			

* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

RECOMENDACIONES: _____

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

Ing. Marcelo Jácome Valdez
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

DERECHOS DE AUTORÍA

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Garrido Jaramillo Santiago Javier

Villa Tuquinga Eduardo Paúl

DECLARACION DE AUTENTICIDAD

Nosotros, Santiago Javier Garrido Jaramillo y Eduardo Paúl Villa Tuquinga, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

Garrido Jaramillo Santiago Javier
Cedula de Identidad: 091666067-3

Villa Tuquinga Eduardo Paúl
Cedula de Identidad: 060412104-6

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a mi Padre por haberme inculcado el gusto por la ingeniería y porque fue la persona más importante para el inicio y culminación de este proyecto.

A mi madre, hermano, esposa e hija por ser el motor fundamental de mi vida, a toda mi familia por su cariño, consejos y apoyo durante esta etapa que ahora se termina.

Santiago Garrido Jaramillo

Dedico este logro alcanzado primeramente a Dios por haberme dado la fortaleza y perseverancia de culminar uno de mis objetivos en esta institución.

A mi Padre y a mi Madre que con su esfuerzo sacrificio y trabajo nunca me abandonaron en los momentos más difíciles, por su apoyo incondicional y consejos.

A mis hermanos que siempre me demostraron su cariño y aprecio en los momentos más difíciles de la carrera con sus palabras de ánimo y compañía.

A todos mis amigos y compañeros que estuvieron presentes para extenderme una mano en las adversidades de mi vida.

Y agradezco inmensamente al apoyo, palabras de aliento y amor a Lilia que siempre ha estado junto a mí.

Eduardo Villa Tuquinga

AGRADECIMIENTO

Mi sincero agradecimiento a todas las personas que vivieron de cerca este camino estudiantil: A ti mi Dios porque me diste la valentía necesaria salir victoriosa de cada obstáculo.

A mis amados padres por haber sembrado en mí un sentido de responsabilidad y humildad, por haberme enseñado a valorar el sacrificio de cada logro conseguido.

A mi Hermano y Amigos por haber disfrutado de cerca las más lindas experiencias de la vida.

Santiago Javier Garrido Jaramillo

Agradezco a Dios por darme fortaleza para lograr mis metas, a mi familia por brindarme todo el cariño y confianza para ver culminada una meta más de la vida

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Escuela de Ingeniería Industrial, por darme la oportunidad de obtener una profesión, y ser una persona útil a la sociedad.

Agradezco al Ing. Carlos Santillán Mariño e Ing. Jhonny Orozco Ramos, por brindarme su amistad y asesoramiento de la tesis, quienes con la ayuda de su conocimiento y experiencia se logró elaborar el presente documento

Eduardo Paúl Villa Tuquinga

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
2. MARCO TEÓRICO	
2.1 Procesos industriales.....	4
2.1.1 <i>Procesos de manejo de alto riesgo.</i>	4
2.2 Sustancias tóxicas.	4
2.2.1 <i>Tipos de sustancias tóxicas.</i>	4
2.3 Daños por manipulación	6
2.3.1 <i>Daños a la salud.</i>	6
2.3.2 <i>Efecto toxico.</i>	6
2.4 Seguridad para manipulación de sustancias toxicas	7
2.5 Parámetros antropométricos	8
2.5.1 <i>Clasificación de la antropometría.</i>	9
2.5.2 <i>Antropometría estática.</i>	9
2.5.3 <i>Antropometría dinámica.</i>	9
2.6 Estudio de las extremidades superiores	10
2.6.1 <i>Extremidades superiores.</i>	10
2.7 Robótica	13
2.7.1 <i>Brazo robótico</i>	14
2.7.2 <i>Guante sensorial.</i>	14
2.8 Modelación matemática	15
2.8.1 <i>Modelado cinemático.</i>	16
2.8.2 <i>Modelo dinámico.</i>	17
2.9 CAD	18
2.9.1 <i>Impresión 3D.</i>	18
2.10 Componentes	21
2.10.1 <i>Componentes electrónicos.</i>	21
2.10.2 <i>Arduino.</i>	21
2.10.3 <i>Componentes Mecánicos.</i>	22
3. ESTUDIO DE PARÁMETROS ANTROPOMÉTRICOS	
3.1 Introducción	24
3.1.1 <i>El diseño ergonómico y la antropometría.</i>	24
3.1.2 <i>Estructura de sostén.</i>	25
3.1.3 <i>Palancas del cuerpo humano.</i>	25
3.2 Parámetros antropométricos	25
3.2.1 <i>Funcionales.</i>	25
3.2.2 <i>Antropometría estática.</i>	25
3.2.3 <i>Antropometría dinámica.</i>	26
3.3 Determinación de ángulos de giro	27
3.4 Diámetros de agarre y longitudes principales	28

3.4.1	<i>Recolección de información.....</i>	29
4.	MODELACIÓN MATEMÁTICA, ANÁLISIS CINEMÁTICO	
4.1	Análisis dinámico	39
4.1.1	<i>Tornillos de potencia.</i>	39
4.2	Diseño del brazo robótico.	45
4.2.1	<i>Cálculos de grados de libertad del brazo inalámbrico.</i>	45
4.2.2	<i>Comparación del diseño con la mano humana.</i>	47
4.2.3	<i>Clasificación por subconjuntos.</i>	47
4.3	Selección de material	57
4.3.1	<i>Impresión de las piezas.</i>	58
5.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE DEL SISTEMA	
5.1	Selección de componentes electrónicos.....	63
5.2	Tipos de motores que se pueden utilizar en el brazo robótico.	64
5.2.1	<i>Selección de servomotores.</i>	64
5.2.2	<i>Selección de servomotores para el movimiento de los dedos</i>	64
5.2.4	<i>Selección del servomotor para el movimiento del brazo</i>	68
5.2.5	<i>Selección del Arduino.</i>	70
5.2.6	<i>Selección Bluetooth.....</i>	73
5.3	Diseño y construcción del guante sensorizado.	74
5.3.1	<i>Arquitectura del sistema</i>	74
5.3.2	<i>Elementos del guante sensorizado.</i>	74
5.3.3	<i>Construcción del guante sensorizado.</i>	76
5.3.4	<i>Selección Giróscopo 4 ejes.</i>	77
5.4	Componentes mecánicos.....	78
5.5	Ensamble de los componentes	78
5.5.1	<i>Ensamble del Antebrazo.</i>	79
5.5.2	<i>Ensamble de la muñeca de rotación.</i>	81
5.5.3	<i>Ensamble de la mano.</i>	83
5.5.4	<i>Ensamble de la muñeca con el antebrazo.</i>	89
5.5.5	<i>Montaje de los tendones.</i>	89
5.5.7	<i>Ensamble del hombro.</i>	95
6.	PROGRAMACIÓN, COMUNICACIÓN Y PRUEBAS	
6.1	Lenguaje Arduino	97
6.1.1	<i>Estructura de programación de lenguaje Arduino.</i>	97
6.1.2	<i>Estructura empleada en la programación del brazo.</i>	99
6.2	Configuración Máster - Esclavo Bluetooth.	101
6.2.1	<i>Comunicación bluetooth.</i>	101
6.2.2	<i>Comandos attention.</i>	102
6.2.3	<i>Configuración del módulo bluetooth Maestro-Esclavo comandos AT.....</i>	103
6.2.4	<i>Conexión física del Marter- Esclavo bluetooth.</i>	104
6.2.5	<i>Programación realizada para la comunicación master – esclavo.</i>	105
6.3	Similitud de movimientos.....	106
6.3.1	<i>Posiciones del brazo inalámbrico.....</i>	108
6.4	Pruebas de sujeción.....	109
6.5	Pruebas de seguridad	111
6.6	Indicaciones de utilización del prototipo	111
6.6.1	<i>Indicaciones de seguridad.</i>	111
6.6.2	<i>Indicaciones generales.</i>	112

6.6.3	<i>Descripción de funcionamiento.</i>	112
6.6.4	<i>Recomendaciones para su uso.</i>	113
6.7	Costos y financiamiento.....	113
6.7.1	<i>Costos directos</i>	114
6.7.2	<i>Costos indirectos</i>	114
6.7.3	<i>Costo total</i>	115
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
7.1	Conclusiones	116
7.2	Recomendaciones	116

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1 Parámetros del brazo.....	27
2 Datos obtenidos.....	30
3 Valor de Z.....	31
4 Cálculos con un percentil de P95.....	32
5 Datos tomados a los trabajadores.....	32
6 Cálculos con un percentil de P95.....	33
7 Parámetros de enlace Denavit-Hartenberg	36
8 Datos para cálculo de carga a levantar.....	43
9 Datos	44
10 Resultados.....	45
11 Numero de eslabones y uniones.....	46
12 Subconjuntos.....	48
13 Datos obtenidos.....	49
14 Comparación de medidas.....	50
15 Comparación de medidas del antebrazo	52
16 Propiedades mecánicas y físicas (ABS, PLA)	58
17 Especificaciones técnicas de la impresora	59
18 Parámetros de impresión de la muñeca.....	60
19 Parámetros de impresión de la mano	61
20 Parámetros de impresión del antebrazo	61
21 Parámetros de impresión del bíceps.....	62
22 Parámetros de impresión del hombro	62
23 Ponderación	63
24 Selección de la mejor alternativa	65
25 Características Servomotor HS-485BB	66
26 Selección de la mejor alternativa	67
27 Características Servomotores MG996	68
28 Selección de la mejor alternativa	69
29 Características del servomotor HS-805BB	70
30 Selección de la mejor alternativa	71
31 Características Arduino Leonardo R3.....	72
32 Características del módulo bluetooth Hc-05.....	73
33 Características sensor flex	75
34 Rango de movimiento de las articulaciones de la mano	107
35 Resultado de pruebas	110
36 Costos directos parte eléctrica-electrónica	114
37 Costos directos parte mecánica.....	114
38 Costos indirectos.....	114
39 Costo total	115

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
1	Clases de peligro y símbolos de las sustancias químicas	5
2	Manipulación de productos químicos	8
3	Antropometría estática.....	9
4	Espacio ergonómico	9
5	Extremidad superior derecha.	10
6	Cintura escapular	10
7	Movimientos de la mano	12
8	Agarre de la mano.....	13
9	Brazo Robótico	14
10	Guante Sensorial.....	15
11	Diseño en Solid Works	18
12	Tecnología FDM.....	19
13	ABS	20
14	PLA.....	20
15	Arduino Leonardo R13	21
16	Modulo Bluetooth HC-05	21
17	Servomotor MG996.....	22
18	Sensor Flexible 2.2”	22
19	Engranajes de dientes rectos	23
20	Mecanismo tornillo sin fin y de potencia	23
21	Brazo humano y brazo robótico.....	24
22	Medidas (Antropometría estática)	26
23	Espacio de trabajo.....	26
24	Ángulos de movimiento del brazo	27
25	Diámetro de agarre interior.....	28
26	Convención de Denavit-Hartenberg para un robot manipulador.....	35
27	Coordenadas de las articulaciones asociadas a los parámetros	36
28	La variación del movimiento de la articulación de rotación de 0 a π	38
29	Variación del movimiento del hombro de 0 a π	38
30	Tornillos.....	39
31	Tornillos de potencia	40
32	Tipos de roscas	41
33	Avance de rosca.....	41
34	Rosca cuadrada	42
35	Tornillo cálculos	43
36	Longitudes para determinar la fuerza de levantamiento.....	44
37	Comparación de una mano humano	47
38	Partes detalladas de la mano	48
39	Diseño de la palma	49
40	Articulaciones tipo bisagra	50

41	Estructura del dedo pulgar	51
42	Partes de la mano unidas	51
43	Estructura de la muñeca.....	52
44	Antebrazo.....	53
45	Ensamble del antebrazo	54
46	Piezas del brazo (bíceps)	55
47	Estructura completa del brazo	55
48	Partes principales del hombro.....	56
49	Hombro armado	56
50	Acople del brazo inalámbrico	57
51	Impresora Makerbot Replacator	59
52	Servomotor Hitec HS-485BB	66
53	Servomotor MG996	68
54	Servomotor HS-805BB.....	70
55	Arduino Leonardo R3	72
56	Modulo Bluetooth Hc-05	73
57	Guante de algodón.	74
58	Rango de ángulos de reacción del Flex sensor	75
59	Sensores flex colocados en el guante.....	76
60	Cables de salida sensores flex.....	77
61	Unión del antebrazo	79
62	Base para montar los servomotores	80
63	Servomotores ubicados.....	80
64	Poleas.....	81
65	Piezas de la muñeca.....	81
66	Montaje del servomotor y rueda dentada.....	82
67	Montaje del sistema de giro de la muñeca.....	82
68	Montaje de la pieza guía de cables	83
69	Ensamble total de la muñeca	83
70	Piezas principales de la mano	84
71	Partes principales del dedo	84
72	Arreglo y unión de las piezas del dedo	85
73	Ensamble de las articulaciones del dedo.	85
74	Montaje total de las articulaciones	85
75	Montaje de cables (tendones)	86
76	Montaje total de cables en la palma (tendones).....	86
77	Montaje de tendones en los dedos	87
78	Ensamble final de tendones en la mano.....	87
79	Montaje de cubiertas de silicona en los extremos de los dedos.....	88
80	Ensamble de cubiertas superiores en la mano	88
81	Montaje de cables (tendones) en la muñeca	88
82	Montaje de muñeca y antebrazo	89
83	Montaje de cables en los servomotores	89
84	Marca y pegamento en cables (tendones).....	90

85	Montaje completo de cables (tendones)	90
86	Montaje del sistema de giro del antebrazo.	91
87	Ensamble total del antebrazo.	91
88	Modificación del servomotor Hitec HS-805BB	92
89	Desmontaje de placa del servomotor.	92
90	Limpiar soldadura.....	92
91	Longitud adicional del servomotor.....	93
92	Mecanismo de tornillo sin fin del hombro.....	93
93	Tornillo de potencia.....	94
94	Estructura lateral del bíceps.....	94
95	Cubierta del servomotor HS-805 BB.....	94
96	Montaje del sistema de movimiento del antebrazo	95
97	Montaje completo del antebrazo y bíceps	95
98	Hombro ensamblado.....	96
99	Programación movimiento dedos	100
100	Programación movimiento muñeca	100
101	Programación movimiento codo.....	101
102	Master – Esclavo Bluetooth.....	102
103	Configuración comando AT	102
104	Diagrama eléctrico master-esclavo.....	104
105	Conexión física	104
106	Programacion bluetooth.....	105
107	Programacion bluetooth.....	105
108	Programacion bluetooth.....	106
109	Similitud	106
110	Ángulos medidos en el dedo índice.....	107
111	Posición inicial	108
112	Posición final del brazo inalámbrico	108
113	Alcance maximo	109
114	Pruebas.....	109
115	Pruebas.....	110
116	Descripción.....	113

SIMBOLOGIA

T	Torque del servomotor	lb.plg
F	Carga a levantar	lb
p	Paso o avance del tornillo	plg
Θ	Angulo de la hélice de rosca	°

LISTA DE ABREVIACIONES

IESS	Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social
CAD	Diseño Asistido por Computadoras
CLP	Clasificación Etiquetado y Envasado
EPP	Equipos de Protección Personal
FDM	Modelado por Deposición Fundida
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
PLA	Poliácido láctico
RIA	Robot Institute of America

LISTA DE ANEXOS

- A** Subconjunto mano
- B** Subconjunto muñeca
- C** Subconjunto antebrazo
- D** Subconjunto bíceps
- E** Subconjunto hombro

RESUMEN

El proyecto de brazo inalámbrico para procesos industriales de alto riesgo es parte de un estudio minucioso de los movimientos antropométricos de una persona, estos parámetros permiten especificar los valores de alcance, campo de acción, y giros que debe reproducir el brazo.

Este prototipo es comandado por un guante sensorial equipado con sensores flex colocados en cada uno de los dedos; la intercomunicación y reproducción de los movimientos de dedos, mano, codo y el hombro son accionados desde el guante colocado en el operario y ubicado a una distancia máxima de 20 metros considerada segura para el trabajador; todos estos movimientos son resultado de una simulación en Matlab y reproducido por las placas Arduino en su conexión física; la comunicación inalámbrica se lo realiza vía Bluetooth con un HC05 master – esclavo y con alcance de rango probado de entre 15 a 20 metros de separación hombre – centro de trabajo.

Cada elemento que conforma el brazo inalámbrico es diseñado, comprobado y simulado en el programa CAD Solidworks.

El prototipo está impreso en material PLA, se seleccionaron los parámetros de impresión de acuerdo al uso de los elementos, a la par se realizó el ensamble de toda la estructura y se colocaron los mecanismos de movimiento (servomotores, cables) para el movimiento del brazo inalámbrico.

La fuerza máxima de levantamiento comprobada es 3,35 lb.

El resultado final es lograr precautelar la integridad de los trabajadores en lo relacionado a los elementos de seguridad y salud ocupacional en ambientes con condiciones de manipulación de sustancias tóxicas.

ABSTRACT

The project of wireless arm for industrial processes of high irrigation is a part of a meticulous study of the anthropometric movements of a person; these parameters allow specifying the values of reaches, field of action and turns that the arm must reproduce.

This prototype is commanded by a sensory glove equipped with flex sensors placed in each of the fingers; intercommunication and reproduction of movements of the fingers, hand, elbow, and shoulder are driven from the glove placed on the operator and located at a maximum distance of 20 meters considered safe for the worker; all these movements are results of a simulation of Matlab and reproduced by the Arduino boards in their physical connection; wireless communication takes place via Bluetooth with a HC05 master-slave and scope of range tested between 15 to 20 meters of separation man-work center.

Each element that makes up the wireless arm is designed, tested and simulated in the CAD program Solidworks.

The prototype is printed on material PLA the impression parameters were selected in accordance with the use of elements, at the same time there was realized the assembly of the whole structure and the movement mechanisms were placed (servomotors, cables) for the movement of the wireless arm.

The maximum force of lifting tested is 3,35lb.

The end result is to safeguard the integrity of the workers as it relates to the elements of occupational health and safety in environments with conditions of handling toxic substances.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La automatización de los procesos y la utilización de elementos robóticos en las operaciones industriales ya no son historias de ciencia ficción, sino más bien, realidades en los mercados productivos (Barrientos, Penin, Balaguer y Aracil, 2007) y por tanto se está considerando a la robótica industrial como una ciencia en pleno desarrollo.

De acuerdo a la RIA (Robot Institute of America) la robótica industrial es definido como el estudio, fabricación y utilización de robots en los procesos industriales (nof, 1999), esto como la ciencia en general, sin embargo, es de nuestra emulación los robots industriales considerados como: “Un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar diferentes trabajos”

(Barrientos, Penin, Balaguer, y Aracil, 2007), los cuales en los países industrializados ya son empleados y en países como el nuestro, se pretende ir incorporando en los procesos industriales que involucra exactitud, destrezas y como en el caso de esta investigación, en aplicaciones cuyos ambientes se consideren altamente contaminantes y peligrosos para la vida de los trabajadores.

En algunas industrias ecuatorianas, específicamente en los sectores con procesos productivos que involucra la manipulación de componentes de alto riesgo (substancias toxicas), los operarios se encuentran expuestos a sufrir algún accidente o enfermedad laboral por manipulación de dichos elementos con las subsecuentes consecuencias de salud e incluso económicas.

Según informe anual de actividades 2010 del IESS se registraron 7102 casos reportados de accidentes laborales, de los cuales 3554 accidentes ocurrieron en las ramas de Agricultura, Explotación de Minas y Canteras, Industrias Manufactureras todos ellos relacionados con el inadecuado manejo de substancias químicas.

Algunas universidades del país, están también trabajando en el campo de la automatización y robótica como la Universidad Nacional de Loja, Universidad de Cuenca, Politécnica del Ejército y otras; sin embargo, se considera que existen alternativas más prácticas, técnicas y modernas, que hacen que la comunicación, programación y construcción de los elementos del manipulador sean mayores y mejores.

Con estos antecedentes, y como estudiantes directamente vinculados con la mejora continua de los procesos de producción y de su automatización, es menester hacer una propuesta alternativa que permita dar solución al manejo de sustancias tóxicas por parte de un trabajador, mediante un manipulador inalámbrico que emule los movimientos de un brazo humano.

1.2 Justificación

Debido al alto índice de accidentes registrados en las áreas de manejo de sustancias tóxicas y lugares de trabajo de alto riesgo, es alternativa adecuada el poder eliminar el contacto directo del proceso productivo con el trabajador, a través de una máquina que pueda reproducir con la mayor exactitud posible los movimientos de un trabajador, ubicado en una zona segura.

La aplicación de los robots en la industria son netamente actividades repetitivas realizadas por variables programables definidas, sobre todo en la definición de valores de colocación inicial y final de los movimientos y posicionales; cualquier cambio en uno de estos parámetros puede afectar su programación y por ende se pueden generar errores; al ser sustituido esta programación por elementos de control inalámbrica y de reproducción casi instantánea mediante comunicación de enlace por radio frecuencia y unidireccional de los movimientos del trabajador, estos errores serán evitables.

Por tanto, se propone que el operario o trabajador manipule los elementos de su área de trabajo a través de la simulación ejecutada mediante elementos sensoriales ubicados en el brazo del trabajador y que son repetidos por el brazo robótico. Esto mediante una interfaz inalámbrica Bluetooth (Operario-Brazo Robótico), la señal emitida por el emisor (operario) es interpretada por un módulo receptor el cual convierte las señales análogas en una modulación por ancho de pulsos para determinar el ángulo de giro en cada motor el mismo que controla el posicionamiento de cada elemento del brazo.

Indudablemente la aplicación de este equipo para los casos antes mencionados beneficia tanto a empleadores y empleados de industrias que manejen procesos con los riesgos antes mencionados. Para los empleadores la seguridad de tener a su operario completamente libre de cualquier accidente evitando de esta manera los gastos que se generan a la empresa en caso de cualquier incidente. En el caso del empleado, tenga la seguridad de que este equipo garantice su integridad física.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general. Prototipar y construir mediante impresión en 3d un brazo inalámbrico para procesos industriales de alto riesgo.

1.3.2 Objetivos específicos:

- Analizar los aspectos y parámetros que afecta a la seguridad e integridad de los trabajadores los cuales realizan actividades o trabajos en procesos industriales de alto riesgo.
- Determinar las variables básicas de la anatomía, ergonomía y antropométricos para determinar parámetros del diseño de la estructura seleccionada.
- Realizar el estudio de los elementos electrónicos y mecánicos, vinculados con los resultados del análisis cinemático y dinámico, modelización y dibujos CAD a utilizarse en la construcción del proyecto.
- Construir el modelo de brazo inalámbrico, pruebas y evaluaciones.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Procesos industriales

Conjunto de operaciones y procesos unitarios que le ocurren a la materia para ser transformada en un producto final.

2.1.1 *Procesos de manejo de alto riesgo.* Son procedimientos que implican la manipulación de ciertas sustancias químicas que pueden generar perjuicios en la salud del trabajador. Es el motivo por el cual se toma en cuenta la norma NTE INEN 2 266:2000.

Cada vez son más los sectores productivos ecuatorianos, que requieren utilizar productos químicos, por lo que su transporte, almacenamiento y manejo se han convertido en actividades de considerable dinamismo, siendo prioritario la formulación de normas que dirijan estas tareas con eficiencia técnica y económica para evitar los riesgos y accidentes que involucren daños a las personas, propiedad privada y ambiente.

Esta norma establece los requisitos y precauciones que se deben tener en cuenta para el transporte, almacenamiento y manejo de productos químicos peligrosos. Esta norma tiene relación con las actividades de producción, comercialización, transporte, almacenamiento y eliminación de productos químicos peligrosos.

2.2 Sustancias tóxicas

Las sustancias tóxicas pueden generar daños a la salud del trabajador por sus componentes, además de afectar o causar perjuicios al medio ambiente. Los más utilizados son los disolventes orgánicos, ampliamente utilizados en la industria agraria.


2.2.1 *Tipos de sustancias tóxicas.* En los procesos industriales existen diversas sustancias químicas entre estas sustancias existen sustancias que por sus componentes afectan la salud del trabajador, para una clasificación se muestra a continuación las sustancias que se usan con más frecuencia.

- **Disolventes.** son sustancias líquidas que son usados con la finalidad de disolver a otro material independientemente de cual sea el estado físico.
- **Metales.** Los metales están presentes en toda actividad industrial, los residuos de metales causan atmósferas contaminantes debido al desprendimiento de gases al momento de ser sometidos a distintos procesos como: corte, soldadura, procesos metalúrgicos etc.
- **Residuos tóxicos y peligrosos.** Los residuos tóxicos son materiales sólidos, pastosos o líquidos generados en un proceso industrial, de producción, transformación o de consumo, algunos de estos residuos son muy peligrosos para la salud del trabajador y para el medio ambiente debido a sus cantidades y altas concentraciones tóxicas.

Cada sustancia tiene su clasificación etiquetado y envasado (CLP), los pictogramas sirven para etiquetar las diferentes sustancias químicas y advierten la naturaleza de peligro o peligros asociados a la utilización de sustancias o mezclas peligrosas.

La toxicidad es la capacidad de alguna sustancia química de producir efectos perjudiciales sobre un ser vivo, al entrar en contacto con él. Tóxico es cualquier sustancia, artificial o natural, que posea toxicidad (es decir, cualquier sustancia que produzca un efecto dañino sobre los seres vivos al entrar en contacto con ellos). En la siguiente figura se muestra los distintos tipos de sustancias tóxicas.

Figura 1. Clases de peligro y símbolos de las sustancias químicas

PELIGRO	CLASIFICACIÓN	Símbolos de peligro (RE)	Pictogramas de peligro (CLP)
Productos que originan accidentes	Inflamables Muy inflamables Comburentes u oxidantes Explosivos Corrosivos	  	   
Productos o sustancias que producen daños a la salud	Tóxicos Muy tóxicos Nocivos Sensibilizantes Irritantes Cancerígenos Mutágenos Tóxicos para la reproducción Disruptores endocrinos	    	    
Productos o sustancias que dañan el medio ambiente	Ecotóxicos Contaminantes de las aguas Contaminantes de suelos Contaminantes atmosféricos Persistentes Bioacumulativos		

Fuente: <http://goo.gl/jODtYZ>

2.3 Daños por manipulación

Las personas que están directamente involucradas con la manipulación de sustancias químicas tienen un alto riesgo para su salud. Existen factores de riesgo que pueden incrementar el daño a la salud, estos factores pueden clasificarse en tres grupos:

- El agente químico. Se basa en la composición química de la sustancia, pueden ser las sustancias que se desprenden y pueden ser absorbidas y causen daño.
- Las condiciones del puesto de trabajo. Se puede considerar un contacto directo con el trabajador, por causas ajenas al propio contaminante: manipulación inadecuada, movimientos del aire, tipo de proceso.
- Comportamiento individual. Se deben a hábitos del trabajador en procesos industriales, tanto temporales (embarazo), como crónicas (se consideran como enfermedades, alergias, etc.), son difíciles de valorar pero que es fundamental tener en cuenta para garantizar un adecuado ambiente laboral.

2.3.1 Daños a la salud. Se consideran daños a la salud aquellas enfermedades o lesiones sufridas por causa del trabajo.

Los daños en la salud provocados por sustancias químicas pueden ser accidentes de trabajo ocasionados (en el momento que se produce la exposición), o enfermedades profesionales (debido a exposiciones prolongadas en el trabajo o posiciones forzadas al proceder con el trabajo).

Los daños son ocasionados por la composición química de las sustancias, por la forma en que se utiliza, por el medio o ambiente de trabajo, por la vía de entrada de los agentes, por condiciones propias del trabajador (enfermedades, alergias etc.), y por la frecuencia, duración y exposición.

2.3.2 Efecto tóxico. Se produce por agentes tóxicos e un organismo, se manifiesta por cambios biológicos, distribución, biotransformación y eliminación, en casos particulares la eliminación de estos agentes no es posible debido al alto grado de toxicidad.

2.4 Seguridad para manipulación de sustancias tóxicas

El peligro de trabajar manipulando sustancias tóxicas se deriva principalmente del desconocimiento que puedan tener los trabajadores de los riesgos para la salud que tienen muchas sustancias químicas. Las sustancias químicas más nocivas que manipulan los trabajadores son de muy variada composición y de efectos muy diversos sobre la salud.

En los procesos de la industria moderna intervienen miles de productos químicos distintos, presentando cada uno características que hacen que su empleo presente distintos grados de riesgo variando los efectos sobre la salud y sobre el medio ambiente de forma notoria de unos a otros (NTE INEN 2266 , 2000).

Medidas de seguridad en la manipulación de sustancias tóxicas:

- Establecer procedimientos seguros para manipulación de productos químicos, las personas que están en contacto con sustancias químicas deben ser capacitadas sobre los peligros que pueden ocurrir.
- Tener información suficiente para actuar en caso de derrame o contacto con agentes químicos, para la eliminación o neutralización.
- Con nuestra investigación el procedimiento para manipular sustancias químicas será altamente seguro, porque el trabajador no estará en contacto con sustancias peligrosas gracias al brazo controlado inalámbricamente.
- Cada actividad tendrá su EPP específico, se debe usar de forma correcta. En algún caso se puede requerir de EPP especiales como máscaras.
- Disponer de sistemas de seguridad y planes de contingencia en cada área donde se trabaje con sustancias químicas para una rápida actuación en caso de accidentes o incidentes (incendio, explosión, derrame), también es importante contar con cámaras de descontaminación o duchas de seguridad y una fuente lavavojos .estos sistemas estarán controlados periódicamente para controlar su buen funcionamiento.

- Nunca manipular sustancias desconocidas con las manos, mantener siempre mucha concentración en el trabajo.
- Siempre estar acompañado durante operaciones de riesgo con sustancias químicas peligrosas, en particular en horarios inusuales (fuera de horas habituales o por las noches).
- No desprender por ningún motivo las etiquetas en recipientes y botellas. No reutilizar recipientes para otros productos sin quitar la etiqueta original.

Figura 2. Manipulación de productos químicos



Fuente: <https://goo.gl/DMiqEU>

2.5 Parámetros antropométricos

Antropometría es la ciencia que se encarga del estudio de las dimensiones del cuerpo humano con el fin de establecer diferencias entre los seres humanos. El estudio antropométrico resulta de gran importancia en el diseño industrial, diseño de equipos de protección individual, diseño de equipos etc., además nos sirve para determinar el espacio que una persona necesita para realizar las actividades.

Para contar con datos fiables sobre las dimensiones del cuerpo humano, se miden distintas poblaciones teniendo en cuenta diferentes factores como:

- Sexo
- Edad
- Grupo étnico
- País

2.5.2 *Antropometría estática.* La antropometría estática es la encargada del estudio de las medidas del cuerpo en reposo en diferentes posiciones. Las medidas de los estudios antropométricos mostrados resultan de importancia para el diseño del espacio en el cual se va desplazar el brazo.

2.5.3 *Antropometría dinámica.* La antropometría dinámica es la que analiza o se dedica al estudio del cuerpo durante las actividades, considera el desplazamiento horizontal, vertical laterales, axiales. En los colores mostrados en el la figura se muestra el espacio máximo y el mínimo requeridos por el brazo todo a partir de las medidas ergonómicas necesarias.

[illegible]

9

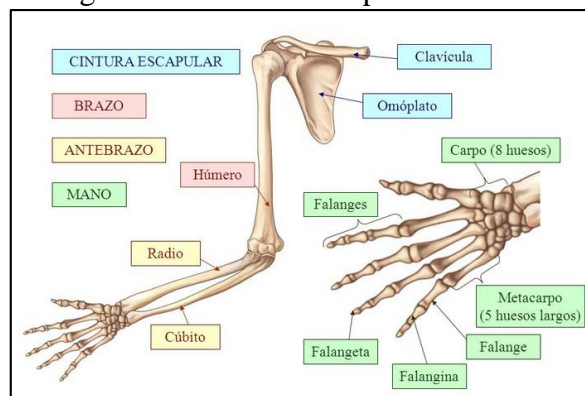
2.6 Estudio de las extremidades superiores

Para nuestra investigación debemos saber las partes principales y el principio de funcionamiento de un brazo humano para emular sus acciones y movimientos.

2.6.1 *Extremidades superiores.* En el cuerpo humano, es cada una de las extremidades que se fijan a la parte superior del tronco.

Se compone de cuatro segmentos: cintura escapular (hombro), brazo, antebrazo y mano.

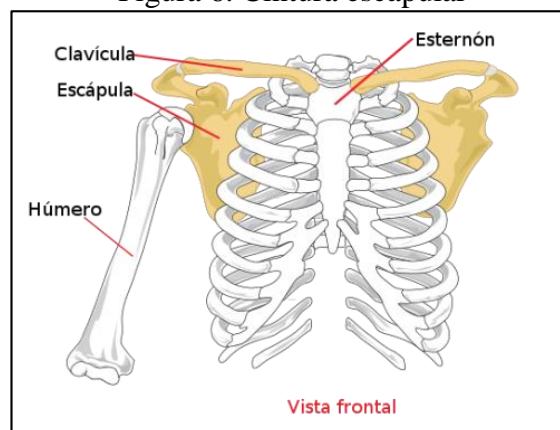
Figura 5. Extremidad superior derecha.



Fuente: <http://slideplayer.es>

2.6.1.1 *Cintura escapular (hombro).* Es el segmento proximal del miembro superior. Se extiende desde la base del cuello hasta el borde inferior del músculo pectoral mayor. La cintura escapular se encuentra formada por la escápula y la clavícula (Derrickson., 2006 pág. 235).

Figura 6. Cintura escapular



Fuente: <https://es.wikipedia.org>

2.6.1.2 *Brazo.* Su esqueleto está formado por un solo hueso: el húmero.

2.6.1.3 *Antebrazo.* Está formado por el cúbito y radio.

2.6.1.4 *Mano.* En los vertebrados, a partir de los anfibios hasta los humanos, existen varias piezas esqueléticas articuladas entre sí después del antebrazo que forman el Carpo; a continuación de éstas, y articulados con ellas, cinco radios óseos que constituyen el metacarpo, de cuyos extremos distales se desprenden cinco apéndices libres: Los dedos, constituidos por tres piezas esqueléticas: falange, falangina y falangeta Figura 4. (Excepto uno de ellos, que consta de dos falanges solamente) (Derrickson., 2006 pág. 238).

La mano es la parte principal en nuestra investigación, estudiaremos más a fondo todos los movimientos y las partes principales.

2.6.1.5 *La mano humana y sus movimientos.* La relevancia de la mano humana como referencia en el diseño de un efector final o manipulador se basa en: a) el ser humano utiliza su mano como primer contacto con el mundo para conocerlo y desenvolverse en él; b) los instrumentos y artefactos que el hombre diseña y que se encuentran en la vida diaria, tienen como base de diseño el concepto de que serán manipulados por una mano humana y; c) la mano es el elemento más común en el que se piensa para realizar manipulación o aprehensión. También existen razones de carácter técnico para intentar simular la mano humana. La mano humana tiene un número alto de grados de libertad, alta relación fuerza/peso, bajo factor de forma (es compacta) y un sistema sensorial complejo (P, 2005).

2.6.1.6 *Movimientos.* El movimiento de la mano humana es importante para el principio de diseño de manos robóticas o prótesis. La muñeca es la parte de la mano que soporta todos los movimientos de la mano, tiene dos grados de libertad, al igual que los dedos que también tiene dos grados de libertad en la articulación con la palma conocida como articulación metacarpofalangeal.

Los posibles movimientos se generan en torno a dos ejes, los movimientos posibles son:

De flexión y extensión, y abducción y aducción, a estos movimientos se puede añadir rotación axial de origen pasivo.

- Flexión y extensión.

Los movimientos de flexión y extensión se producen en torno a un eje transverso de la cabeza del metacarpiano durante el movimiento de extensión, la superficie anterior de la cabeza del metacarpiano se articula con el movimiento palmar, mientras que en el movimiento de flexión el ligamento se mueve más allá de la cabeza y gira sobre sí mismo para deslizarse a lo largo de la superficie palmar de la diáfisis del metacarpiano.

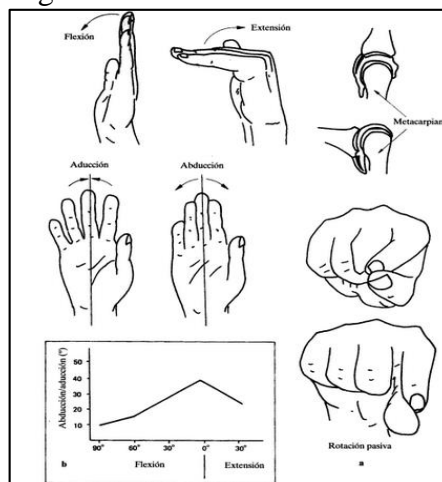
Un estudio con más de 400 personas dio como resultado los siguientes grados de flexión/extensión activa/pasiva para cada uno de los dedos: índice $148^\circ/155^\circ$, corazón, $145^\circ/155^\circ$, anular; $149^\circ/159^\circ$; y meñique, $152/172$ (T.E., 1978 págs. 109-118).

- Abducción y aducción.

Los movimientos de abducción y aducción de la articulación se producen en torno a un eje anteroposterior a través de la cabeza del metacarpiano.

En una amplitud mayor cuando el dedo esta movimiento es más fácil y presenta una amplitud mayor cuando el dedo está extendido siendo de hasta 30° en cada dirección (fig. 6) la amplitud total registrada en los movimientos de abducción y aducción activa/pasiva, con los dedos en posición neutra es la siguiente; índice $50^\circ/62^\circ$, corazón, $40^\circ/53^\circ$, anular; $38^\circ/55^\circ$; y meñique, $57^\circ/68^\circ$. Rotación activa: la rotación activa no es posible excepto en el dedo meñique (T.E., 1978 págs. 109-118).

Figura 7. Movimientos de la mano

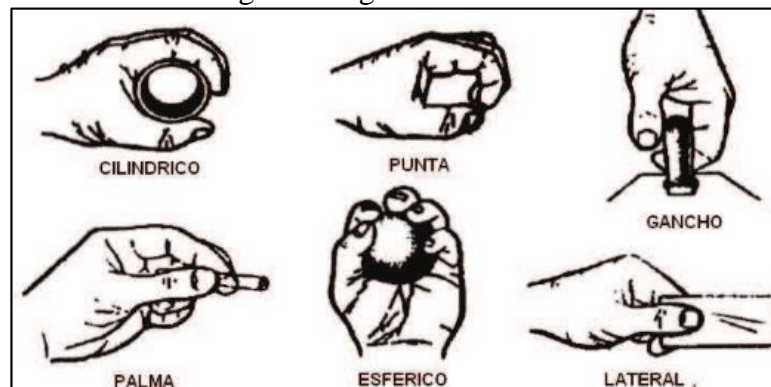


Fuente: Journal of biomechanics, 11,109-118

- Agarre de la mano humana

El pulgar tiene un gran movimiento si, si lo comparamos con los otros dedos que poseen un movimiento limitado, el pulgar juega un trabajo clave para el agarre de objetos con seguridad de la mano, En 1919, Schlesinger desarrolló una clasificación de la taxonomía para el estudio de la destreza de las manos humanas y la planificación de prótesis. Este autor agrupò en seis categorías las estrategias de agarre de la mano humana: agarre cilíndrico (Cylindrical Grasp), de punta (Tip), de gancho (Hook or Snap), de palma (Palmar), esférico (Spherical Grasp) y de lado (Lateral)(Taylor G.L., 1955 págs. 22-35).

Figura 8. Agarre de la mano



Fuente: TAYLOR G.L, The anatomy and mechanics of the human hand

2.7 Robótica

La robótica es la rama de la tecnología que se dedica al diseño, construcción, operación, disposición estructural, manufactura y aplicación de los robots.

La robótica combina diversas disciplinas como son: la mecánica, la electrónica, la informática, la inteligencia artificial, la ingeniería de control y la física. Otras áreas importantes en robótica son el álgebra, los autómatas programables, la animatrónica y las máquinas de estados.

El termino robótica se le atribuye a Isaac Asimov, así como este término procede de la palabra “robot” cuya definición adoptada por el instituto Norteamericano de robótica aceptada internacionalmente es: “Manipulador multifuncional y programable, diseñado para mover piezas, materiales herramienta o dispositivos especiales, mediante movimientos programados y variables que permiten llevar a cabo diversas tareas”

2.7.1 *Brazo robótico.* Un brazo robótico es un elemento mecánico y electrónico diseñado según la anatomía humana capaz de simular los movimientos de un brazo humano, mediante sensores, elementos electrónicos, etc. Se puede controlar mediante guantes sensoriales, mandos a distancia (celulares, aparatos electrónicos)

Figura 9. Brazo Robótico



Fuente: <http://cuidandomimundo.com>

2.7.2 *Guante sensorial.* Los primeros guantes electrónicos se crearon con la intención de reducir las limitaciones de los elementos periféricos de las computadoras, las cuales imponían el uso de las manos.

La realidad virtual es uno de los campos en donde más se utilizan los guantes electrónicos, por ello la mayoría de guantes son diseñados para este fin, pero eso no implica que puedan ser usados para otras aplicaciones.

En cuanto a su evolución los primeros guantes empleaban elementos magnéticos muy precisos pero sensibles a objetos metálicos cercanos que provocaban la distorsión del campo y generaban errores.

Hoy en día se utilizan bandas resistivas flexibles con lo cual se facilita el censado de datos obteniéndose una buena resolución sin un hardware complicado. Adicionalmente también se crearon exoesqueletos los cuales tienen una estructura mecánica paralela y sobrepuesta a la mano con rotores y sensores en cada articulación.

Poseen una alta precisión por lo que se utilizan en aplicaciones delicadas.

Figura 10. Guante Sensorial.



Fuente: <http://www.biolab.tel.uva.es>

2.8 Modelación matemática

El modelaje y la simulación de un sistema físico permiten predecir el comportamiento de éste ante ciertas condiciones específicas. Esto resulta de gran ventaja dado que, una vez que se ha validado el modelo matemático propuesto con la respuesta física del sistema real, entonces se puede usar dicho modelo para estimar la salida del sistema ante una determinada entrada, sin tener que ir al sistema físico a obtener su respuesta real, o bien se puede utilizar el modelo para diseñar estrategias de control del sistema.

En este sentido, el modelaje matemático de un sistema físico se refiere al proceso de obtención de un conjunto de ecuaciones que desde el punto de vista del alcance de lo que se quiere simular del sistema, se considera que lo representan de manera suficiente. La simulación por su parte, trata con la generación y visualización de data obtenida a partir de la resolución del modelo matemático.

Es importante tener en cuenta que la exactitud del modelo matemático respecto al sistema físico casi nunca es alcanzada (Harbor, 1996). Es decir, la aproximación del modelo matemático a la realidad del sistema físico se puede incrementar aumentando la complejidad de las ecuaciones que se utilizan para describirlo, pero casi nunca se alcanza la exactitud. De igual forma, un mismo sistema físico puede ser representado por más de un modelo matemático, o más aún, por n modelos matemáticos de los cuales no se puede esperar más que una aproximación a la respuesta real del mismo.

Esta aproximación será mejor en la medida que se hagan menos simplificaciones, o lo que es lo mismo, se considere un mayor número de variables involucradas en el sistema físico, lo cual conlleva ineludiblemente a una mayor complejidad de las ecuaciones del

modelo matemático en cuestión (Modelado matematico y simulacion de un robot manipulador de microprocesadores: Dos enfoques, 2006).

2.8.1 *Modelado cinemático.* La cinemática es la ciencia que se encarga del estudio del movimiento sin importar las fuerzas que lo producen. Dentro de la cinemática se estudia, la velocidad, la aceleración, y otras variables de posición respecto al tiempo.

El modelo cinemático es una metodología que describe las relaciones estáticas entre las posiciones de las articulaciones de un robot, las coordenadas cartesianas y la posición de su actuador final (Stone, 1986). El modelo cinemático de un robot es usado para su simulación y control. Los modelos tienen como base las transformaciones matriciales compuestas de sistemas de referencia y resultan más complejos a medida que se agregan grados de libertad al robot (Ollero, 2001).

La cinemática del brazo del robot trata con el estudio analítico de la geometría del movimiento de un brazo de robot con respecto a un sistema de coordenadas de referencia fijo sin considerar las fuerzas o momentos que originan el movimiento.

Así, la cinemática se interesa por la descripción analítica del desplazamiento espacial del robot como una función del tiempo, en particular de las relaciones entre la posición de las variables de articulación y la posición y orientación del efecto final del brazo del robot.

Hay dos tipos de problemas fundamentales en la cinética, modelo cinemático directo y modelo cinemático inverso.

2.8.1.1 *Modelo cinemático directo.* El objetivo de este modelo es determinar las posiciones espaciales mediante posiciones angulares, para este modelo se utiliza el algoritmo de Denavit-Hartenberg, que es un método de matrices que permite determinar de manera ordenada un sistema de coordenadas unido a cada eslabón.

Este método utiliza una matriz de transformación homogénea 4×4 para describir la relación espacial entre dos elementos mecánicos rígidos adyacentes y reduce el problema Cinemático directo a encontrar una matriz de transformación homogénea 4×4 que relaciona el desplazamiento espacial del sistema de coordenadas de la mano al sistema de coordenadas de referencia. Estas matrices de transformación homogéneas son también

útiles en derivar las ecuaciones dinámicas de movimiento del brazo del robot. En general, el problema Cinemático inverso se puede resolver mediante algunas técnicas. Los métodos utilizados más comúnmente son el algebraico matricial, iterativo o geométrico (ESTRELLA, 2014).

2.8.1.2 Modelo cinemático inverso. El modelo cinemático inverso es el que permite calcular las variables articulares del robot en función de la posición y orientación del efector final deseadas. El modelo cinemático inverso involucra la resolución de sistemas de ecuaciones no lineales que involucran senos y cosenos. Al momento de resolver este sistema de ecuaciones se debe primero determinar si existen soluciones dentro del espacio de trabajo del robot. Existen algunos casos en los que existe más de una solución aceptable (Ollero, 2001). En concreto con la cinemática inversa obtenemos las posiciones angulares por medio de las posiciones cordiales.

2.8.2 Modelo dinámico. La dinámica del robot, por otra parte, trata con la formulación matemática de las ecuaciones del movimiento de un manipulador son un conjunto de ecuaciones matemáticas que describen la conducta dinámica del manipulador. Tales ecuaciones de movimiento son útiles para simulación en ordenadores del movimiento del brazo, el diseño de ecuaciones de control apropiadas para el robot y la evaluación del diseño y estructura cinemática del robot (ESTRELLA, 2014).

Es necesario calcular las ecuaciones de movimiento para cada articulación. El modelo dinámico de un manipulador de n grados de libertad está regido por:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + f(\dot{q}) \quad (1)$$

Donde:

τ = Torque ejercido por los actuadores de cada articulación

q = vector de variables articulares

$M(q)$ = Matriz de inercia

$C(q, \dot{q})$ = Matriz centrífuga y de coriolis

$g(q)$ = Vector de gravedad

$f(q)$ = Propiedades de la dinámica residual

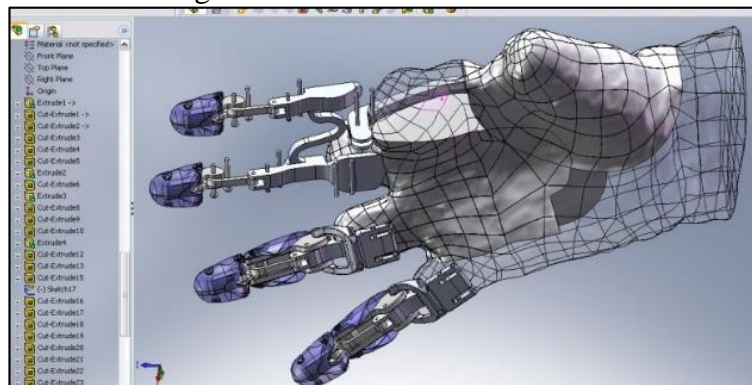
Para encontrar estos modelos existe:

- Formulación Lagrange que se basa en el balance energético
- Formulación de Newton- Euler que se basa en la segunda ley de Newton y la ecuación de inercia de Euler.

2.9 Dibujo asistido por computadora (CAD)

Los programas CAD (dibujo asistido por computadora), son muy utilizados en trabajos de ingeniería diseño de elementos mecánicos arquitectura etc. Hay diversos programas CAD, para esta investigación se utilizara el programa Solidworks por ser una herramienta que presta las facilidades de diseño y que además incorpora una poderosa herramienta de simulación.

Figura 11. Diseño en Solid Works

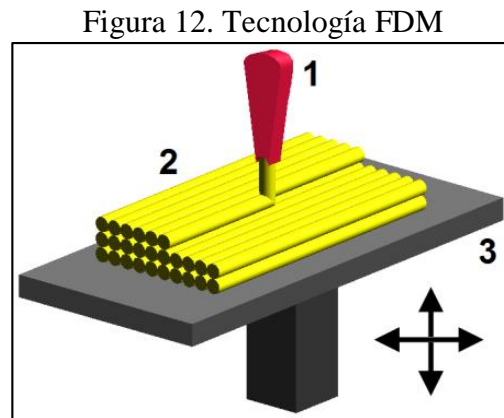


Fuente: <http://www.caddcentrerohini.com>

El primer paso para la construcción de las partes del brazo es el diseño en un programa CAD, en nuestra investigación se empleara una impresora 3D para construir todas las partes del brazo, por esto es necesario saber los principios básicos de este innovador método de fabricación.

2.9.1 Impresión 3D. La impresión 3D permite obtener cuerpos tridimensionales volumétricos a partir de un diseño en cualquier programa CAD, para lograr la impresión se utilizan procesos aditivos, que son procesos donde se depositan capas sucesivas de material hasta obtener el elemento deseado. Existen varios métodos pero todos se basan en la tecnología por deposición fundida o (FDM).

2.9.1.1 *Tecnología FDM (Modelado por deposición fundida).* Fue desarrollada por S. Scott Crump a finales de los años 80 y comercializada en 1990 por Stratasys (USA), empresa de la cual fue fundador. un filamento es introducido en una boquilla la cual se calienta por encima a la temperatura de fusión del material, la boquilla se desplaza en dos ejes x & y según la forma de la pieza, y la cama caliente o base se desplaza en el eje z hacia abajo para permitir que las capas de material se vayan depositando.



Fuente: <https://es.wikipedia.org>

2.9.1.2 *Material (filamentos de plástico).* Los filamentos de plástico se encuentran enrollados en un cilindro y a medida que avanza la impresión estos se van desenrollando para proveer material.

Hay varios materiales utilizados en impresoras 3d, pero existen dos tipos de plásticos más utilizados: ABS Y PLA.

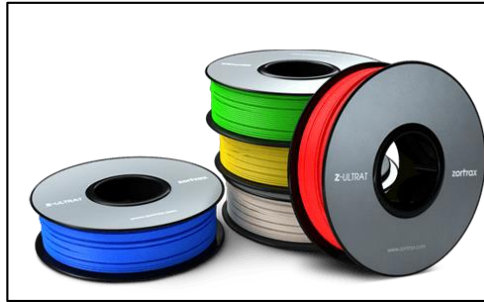
- Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)

Está hecho de Acrilonitrilo Butadieno Estireno, un plástico elaborado a base de petróleo de este material están hechos los legos.

Se debe tener cuidado con la utilización de este material porque al calentarse despiden vapores que pueden afectar a la salud, por eso se debe trabajar en lugares con buena ventilación para descartar incidentes.

El punto de fusión del ABS es de 105° C, en el mercado hay diferentes colores en su presentación.

Figura 13. ABS



Fuente: <http://shaperize.com>

- Plástico ácido poliláctico (PLA)

El filamento de plástico más común está hecho de ácido poliláctico (PLA), un plástico biodegradable y ambientalmente amigable derivado del almidón, su temperatura de fundición está en el rango de 180-230°C. No despiden vapores tóxicos al fundirlo, por lo que no requiere precauciones especiales de seguridad o ventilación.

Se adhiere bien a la cama caliente.

Los objetos impresos en PLA son robustos pero relativamente frágiles y no pueden ser usados cuando se requiere de resistencia a altas temperaturas. El filamento de PLA no es muy costoso y está disponible en color natural o en varios colores brillantes, sólidos o semitransparentes, y los objetos impresos con este material tienen una agradable superficie lisa. Temperatura y a una velocidad muy baja, puede además ser usado para imprimir juntas, correas flexibles, etc.

Una ventaja del ABS sobre el PLA es que los objetos resultantes son más robustos y menos quebradizos, y pueden resistir altas temperaturas. El filamento de ABS está disponible en muchos colores, colores brillantes en la oscuridad, oro y plata, e incluso colores que cambian con la temperatura.

Figura 14. PLA



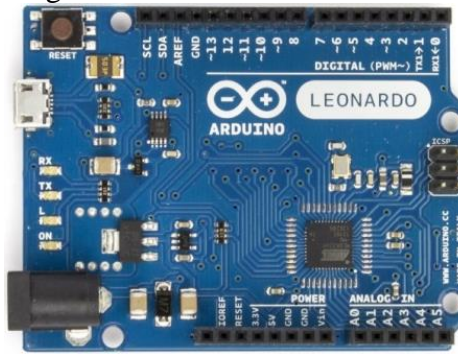
Fuente: <http://www.logismarket.com>.

2.10 Componentes

2.10.1 Componentes electrónicos. El brazo robótico está constituido por varios elementos electrónicos, en los que podemos destacar:

2.10.2 Arduino. Es una herramienta para crear computadoras que interactúan con el mundo exterior con mucha más facilidad que una computadora de escritorio. Es una plataforma tipo código abierto que se basa en un microcontrolador y un entorno de programación para escribir software

Figura 15. Arduino Leonardo R13



Fuente: <https://www.arduino.cc>

2.10.2.1 Módulo Bluetooth HC-05. El módulo de bluetooth HC-05 es el que ofrece una mejor relación de precio y características, es un módulo Maestro-Esclavo, quiere decir que además de recibir conexiones desde una PC o tablet, también es capaz de generar conexiones hacia otros dispositivos bluetooth. Esto nos permite por ejemplo, conectar dos módulos de bluetooth y formar una conexión punto a punto para transmitir datos entre dos microcontroladores o dispositivos.

Figura 16. Modulo Bluetooth HC-05



Fuente: Autores

2.10.2.2 Servomotor. Comúnmente llamados servos, es un tipo de motor de corriente continua tiene un eje de posición controlado, se pueden ubicar en cualquier posición dependiendo de su rango de operación esto se logra enviando una señal codificada, el servo mantendrá la posición del engranaje. Está compuesto por un motor, una caja reductora y un circuito. Son ampliamente utilizados en sistemas de radio control y en robótica.

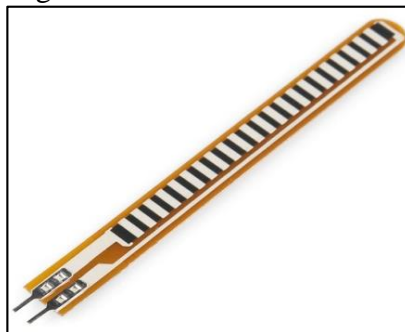
Figura 17. Servomotor MG996



Fuente: <http://www.hobbyist.co>

2.10.2.3 Sensor. Es un dispositivo electrónico que sirve para medir variables físicas en un entorno y convertirlas en señales eléctricas que puedan ser usados por el sistema.

Figura 18. Sensor Flexible 2.2"



Fuente: <https://www.sparkfun.com>

2.10.3 Componentes Mecánicos. Para lograr la movilidad del brazo robótico se cuenta con varios elementos mecánicos.

2.10.3.1 Engranajes. Los engranajes son las piezas mecánicas que se encuentran presentes en casi todos los mecanismos, son sistemas mecánicos formados por ruedas dentadas que transmiten los movimientos circulares y la potencia entre ejes, trabajando

por empuje garantizando así que no haya patinamiento. Los dientes de una rueda dentada son los que realizan el esfuerzo de empuje y transmiten la potencia. las cargas aplicadas la cuales producen o absorben la energía que se produce (Millán, 2010 pág. 185).

Figura 19. Engranajes de dientes rectos



Fuente: <http://energia9.webnode.es>

2.10.3.2 Tornillo sin fin y de potencia. El tornillo sin fin es una pieza motriz provista de rosca cuya sección de forma trapecial tiene como profundidad de la rosca la altura del diente y como paso de rosca el paso de la rueda helicoidal. La forma de los flancos de rosca depende del procedimiento de fabricación y es por lo tanto variable.

Los tornillos sin fin, como todos los tornillos, pueden ser de un paso o de varios pasos o filetes y tener el paso o los pasos de subida hacia la izquierda o hacia la derecha. Los mecanismos de tornillos sin fin están especialmente indicados para reducir el número de revoluciones de un accionamiento a otro más bajo (Appold, y otros, 1985 pág. 372).

Figura 20. Mecanismo tornillo sin fin y de potencia



Fuente: <http://www.profesorenlinea.cl>

CAPÍTULO III

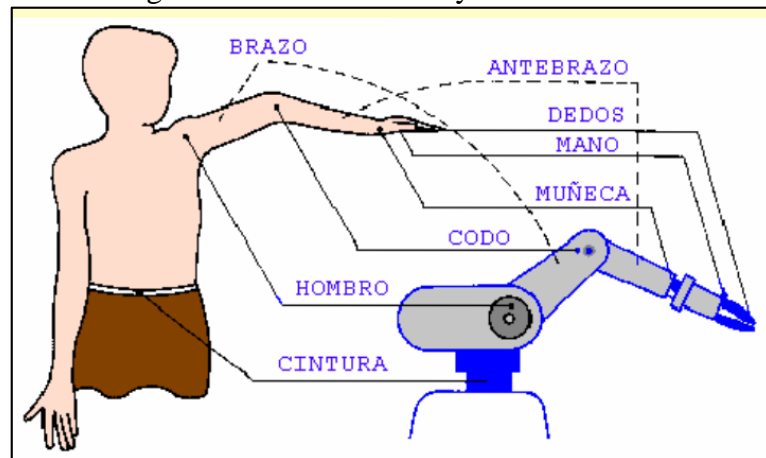
3. ESTUDIO DE PARÁMETROS ANTROPOMÉTRICOS

3.1 Introducción

La antropometría simplemente se puede definir como el estudio de las dimensiones físicas y funcionales de cuerpo.

Los parámetros para el diseño del brazo se ha basado en la anatomía del brazo del ser humano, que se refiere a la maquina perfecta. En la gráfica se puede apreciar la semejanza existente entre el brazo robótico y el brazo del ser humano, para realizar el diseño del brazo inalámbrico se remonta a la biomecánica la cual se interesa por el movimiento del cuerpo humano y las cargas aplicadas la cuales producen o absorben la energía que se produce durante el movimiento (MIRRALLES MARRERO, 2007 pág. 446).

Figura 21. Brazo humano y brazo robótico



Fuente: <https://goo.gl/WozWq7>

Si no se toma en cuenta los parámetros se pueden experimentar dificultad o problemas con la sujeción de objetos, el agarre puede verse afectado en caso de sujetar herramientas de un tamaño mayor al previsto.

3.1.1 *El diseño ergonómico y la antropometría.* Al momento de realizar el diseño se han de tomar en cuenta el diseño de los extremos, el diseño debe tener un intervalo ajustable

Los datos antropométricos tienen una distribución normal, algo común es encontrar la curva de Gaus conociendo la media y la desviación estándar de la población se puede realizar cálculos y tomar decisiones cuando se requiere una aproximación exacta.

3.1.2 *Estructura de sostén.* El cuerpo humano se ha diseñado para moverse con el uso de estructura de sostén como el de los huesos, articulaciones y músculos y este movimiento puede tomar variadas y complicadas formas, debido a esto se ha desarrollado la disciplina de la biomecánica.

Las formas principales que se interesa la biomecánica es la función de mover y levantar.

3.1.3 *Palancas del cuerpo humano.* En el cuerpo humano se constituye por un sistema de palancas el cual consta de segmentos óseos como palancas y las articulas van a conformar los apoyos, los músculos agonistas pasan a ser los encargados de realizar la fuerza de potencia sea de tracción o compresión y la sobrecarga como la fuerza de resistencia.

3.2 Parámetros antropométricos

La antropometría es la ciencia que se encarga del estudio de las dimensiones del cuerpo humano con el fin de establecer diferencias entre los seres humanos.

Las dimensiones se clasifican en:

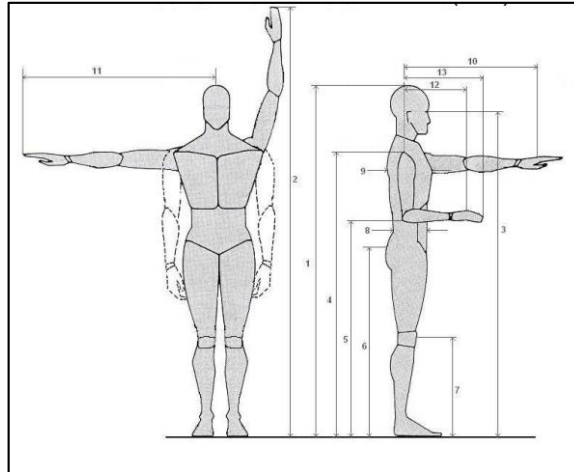
Estructurales: cabeza, tronco y extremidades en posición estándar.

3.2.1 *Funcionales.* Son tomadas durante el movimiento de realizado por el cuerpo.

El estudio antropométrico resulta de importancia pues se ha de determinar el espacio que necesita para realizar las actividades las cuales son específicas para realizar cada situación.

3.2.2 *Antropometría estática.* La antropometría estática es la encargada del estudio de las medidas del cuerpo en reposo. Las medidas de los estudios antropométricos mostrados resultan de importancia para el diseño del espacio en el cual se va desplazar.

Figura 22. Medidas (Antropometría estática)



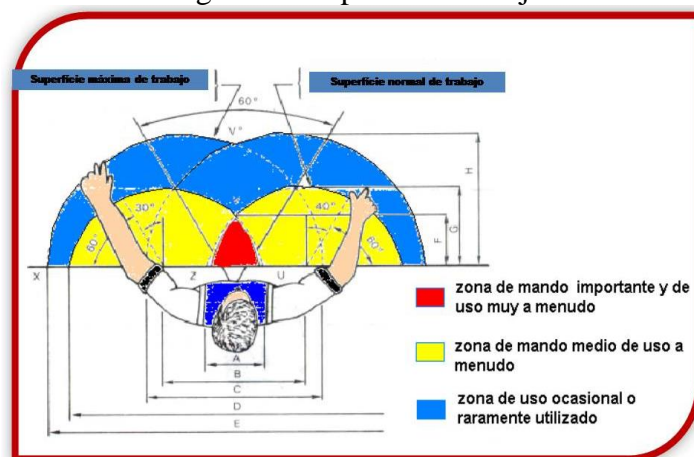
Fuente: <http://goo.gl/D1Ap3U>

Las medidas de los estudios antropométricos mostrados resultan de importancia para el diseño del espacio en el cual se va desplazar el brazo.

3.2.3 Antropometría dinámica. La antropometría dinámica es la que analiza o se dedica al estudio del cuerpo durante las actividades, considera el desplazamiento horizontal, vertical laterales, axiales, en la figura se muestra el desplazamiento existente de las extremidades superiores.

En los colores mostrados en la figura 23 se muestra el espacio máximo y el mínimo requeridos por el brazo todo a partir de las medidas ergonómicas necesarias. El alcance máximo hace referencia al centro del hombro del trabajador se trata de un arco igual a la medida de su brazo extendido.

Figura 23. Espacio de trabajo



Fuente: <https://ergonomia2010.files.wordpress>.

Zona funcional. Es la zona delimitada por los arcos. El primero tiene como centro el inicio del ángulo del codo (-15°) y como medida del antebrazo más la mano.

3.3 Determinación de ángulos de giro

Para la construcción se utilizan 7 servomotores, 5 para el desplazamiento de los dedos uno para el giro de la mano y un último para el desplazamiento del antebrazo, los movimientos y giros estarán limitados por las dimensiones del brazo y por los ángulos de giro de los servomotores. La mano podrá girar con la ayuda de un servomotor ubicado en la muñeca, el giro dependerá de la programación del servomotor, esta programación se realizara con la guía de los ángulos de giro de una mano humana

Para los principales tipos de movimientos y ángulos se realizó un estudio antropométrico de un brazo humano figura 24, las mediciones se realizaron con el individuo en reposo (antropometría estática), se muestran los datos obtenidos después de las mediciones.

Figura 24. Ángulos de movimiento del brazo



Fuente: Autores

Tabla 1. Parámetros del brazo

Descripción	Parámetro
Hombro	$\pm 20^\circ$ y $< 45^\circ$
Codo	Posición inicial 15° respecto a la vertical
Amplitud del brazo	$< 170^\circ$
Amplitud del codo	$< 120^\circ$
Desviación de muñeca	$< 100^\circ$
Giro de muñeca	$< 120^\circ$
Carga sujeción vertical puño cerrado	< 35 Kg
Fuerza de agarre (estimada)	< 16 Kg
Distancia de agarre	$< 4,12$ cm

Fuente: Autores

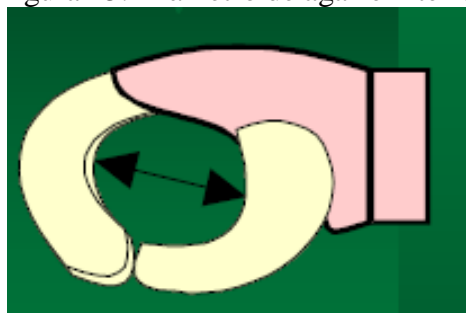
3.4 Diámetros de agarre y longitudes principales

El brazo robótico es una herramienta que ayudara al operario con trabajos de alto riesgo por lo tanto es una herramienta, las herramientas se diseñan en base a las dimensiones de personas el criterio es diseñar, fabricar o adquirir elementos de trabajo con los cuales la mayoría de las personas (al menos el 90 %), desarrollen sus actividades con absoluta comodidad. En lo que respecta al campo de operación de los miembros está determinado por su longitud y ángulo de rotación.

Según P. Jenik de la Escuela Técnica Superior de Darmstadt, la estatura actúa como parámetro antropométrico básico del que se deducen proporcionalmente las otras dimensiones del cuerpo tales como el perímetro torácico, longitud de brazos, longitud de piernas, tamaño de pie, etc. Estas dimensiones no se han considerado en función de sus valores medios sino en función de su frecuencia. Con las medidas del cuerpo humano comprendida entre las tallas 1630 hasta 1900 mm. Arcos descriptos por los movimientos de la muñeca y la mano (teniendo en cuenta la articulación del codo y sin tener en cuenta a ella) El brazo puede describir una rotación 250° alrededor de su eje en el plano sagital en un semicírculo hacia adelante

Los ángulos de desplazamiento del brazo inalámbrico son los que permiten realizar la operación de movimiento, por lo cual es de importancia que el brazo inalámbrico posea una libre movilidad durante su funcionamiento. Además de los ángulos depende la ejecución de la fuerza, se lograra un momento máximo o mínimo según la ubicación o la posición del brazo. Una de las medidas básicas para el correcto diseño del brazo inalámbrico es el diámetro de agarre interior, que es el máximo diámetro que se forma entre el dedo pulgar y el dedo medio.

Figura 25. Diámetro de agarre interior



Fuente: <http://slideplayer.es/slide/3990771/>

Como se observa en la teoría existe la posibilidad de diseñar una herramienta en base a medidas de dimensiones del cuerpo humano, en nuestro proyecto se recolecto información en la empresa Villa Construcciones; a continuación se detalla el método empleado.

3.4.1 *Recolección de información.* Los datos para construir las dimensiones correctas se recolectaron en base a diferentes parámetros para unos datos más confiables:

Observación: es el primer punto para la recolección de datos, se debe identificar las actividades, el lugar, las condiciones del trabajador.

Entrevista: consiste en una entrevista estructurada de forma no compleja, siendo a modo de conversación para que el trabajador se sienta a gusto para lograr la información correcta que se necesita en este proyecto.

Instrumentos: se utilizó instrumentos de medición como cinta métrica para las medidas antropométricas de los trabajadores, calibrador pie de rey para tener una medida más confiable.

Hoja de datos: se necesitó un formato para determinar las medidas antropométricas que se necesitan en esta encuesta.

La información obtenida es la base para la construcción de las medidas del brazo robótico, pero al ser un instrumento que se va a utilizar en trabajos de riesgo se necesita que las dimensiones sean más grandes para tener mayor manipulación.

3.4.1.1 *Población y muestra.*

- Población: está dada por la actual nómina de trabajadores de la empresa que desempeñan trabajos de riesgos con químicos.
- Muestra: dado que la población está conformada por un número reducido de personas, se tomó la totalidad de ella como muestra, cabe indicar que los autores de varios libros mencionan que si la muestra no supera los 50 individuos se considera la población como la muestra.

3.4.1.2 Medidas antropométricas necesarias. Las medidas necesarias son todas las longitudes más representativas del brazo derecho, estas son:

- Longitud de la mano
- Alcance mínimo del brazo hacia delante con agarre
- Alcance mínimo el brazo hacia delante sin agarre
- Largo del brazo a 90° con respecto a la pared
- Diámetro de agarre interior
- Longitud del antebrazo

Una vez establecida las medidas antropométricas se procede a recolectar y organizar información, se realizó entrevistas a cada uno de los trabajadores toma de medidas con la ayuda de herramientas de medición.

La edad promedio de los trabajadores es de 29 años, el número de trabajadores encuestados es 8, las mediciones se realizaron cuando el trabajador estaba en reposo. Los datos que se obtuvieron se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Datos obtenidos

Trabajador	1	2	3	4	5	6	7	8
Edad [años]	26	24	44	27	31	28	25	29
Mediciones efectuadas en el sujeto [cm]								
Longitud de la mano [cm]	17,5	18,0	19,0	18,5	20,0	18,0	17,0	19,0
Alcance mínimo del brazo hacia delante con agarre [cm]	35,0	35,5	37,0	37,0	38,5	35,0	35,5	38,0
Alcance máximo del brazo hacia delante con agarre [cm]	58,0	61,0	62,0	62,0	65,0	61,5	60,0	63,0
Largo del brazo a 90° con respecto a la pared [cm]	80,0	82,5	83,5	83,0	85,0	83,0	83,0	84,0
Diámetro de agarre interior [cm]	4,5	5,0	5,5	5,0	6,5	4,5	4,0	6,0
Longitud del antebrazo [cm]	25,0	24,0	29,0	24,5	30,0	24,0	24,0	28,0

Fuente: Autores

Con estos datos se aplica estadística para elaborar conclusiones sobre las dimensiones requeridas.

Para un diseño que se adapte a todas las medidas y características de las distintos tipos de personas que trabajan en una empresa se debe tener en cuenta los siguientes principios:

- Principio de diseño para extremos
- Principio de diseño para un intervalo ajustable
- Principio de diseño para un promedio

En el proyecto al ser una herramienta para trabajos de alto riesgo las medidas antropométricas serán similar al promedio del brazo de los trabajadores, en este caso se calculara el percentil, el percentil se enfoca en calcular las medidas requeridas excluyendo un cierto porcentaje de la población, por ejemplo si se quiere calcular un percentil de (P95) se refiere a que el 95% de la población estará incluida en las medidas dejando un 5 % fuera.

Formula de percentil.

$$P = X + /- Z\sigma \quad (2)$$

P = percentil

X = media

σ = desviación estándar

Z = es el número de veces que Sigma está separada de la media

De la siguiente tabla se escoge un valor de según el percentil, en nuestro caso Z=1.645

Tabla 3. Valor de Z

P	Z
1 Y 99	2,326
2,5 Y 97,5	1,960
3 Y 97	1,880
5 Y 95	1,645
10 Y 90	1,280
15 Y 85	1,040
20 Y 80	0,840
25 Y 75	0,670
30 Y 70	0,520
40 Y 60	0,250

Fuente: Autores

En el proyecto se calculó un percentil de 95, los datos se obtuvieron mediante el programa de Microsoft office (Excel), en la tabla se muestra lo cálculos realizados.

Tabla 4. Cálculos con un percentil de P95

Mediciones efectuadas en el sujeto	Suma [cm]	Promedio [cm]	σ [cm]	P95 [cm]
Longitud de la mano (LM)	147,000	18,375	0,954	19,940
Alcance mínimo del brazo hacia delante con agarre	291,500	36,430	1,374	38,690
Alcance máximo del brazo hacia delante con agarre	492,500	61,560	2,060	64,940
Largo del brazo a 90° con respecto a la pared	664,000	83,000	1,439	85,370
Diámetro de agarre interior	41,000	5,125	0,834	6,490
Longitud del antebrazo	208,500	26,060	2,513	30,190

Fuente: Autores

El diseño de los dedos es importante para el correcto agarre de la mano, se realizó la toma de medidas con la ayuda de un calibrador pie de rey.

Tabla 5. Datos tomados a los trabajadores

Dedo	Hueso	Medida de los huesos del trabajador [cm]							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Meñique	Falangeta	1,85	2,00	2,05	1,90	2,10	2,00	1,90	2,00
	Falangina	1,75	1,80	1,90	1,80	1,85	1,70	1,70	1,85
	Falange	3,65	3,70	3,60	3,70	3,90	3,60	3,50	3,50
Anular	Falangeta	1,90	2,10	2,15	1,90	2,30	2,20	2,00	2,20
	Falangina	2,00	1,90	1,85	2,10	2,00	2,20	2,30	1,80
	Falange	4,25	4,50	4,60	4,90	4,70	4,40	4,30	4,60
Medio	Falangeta	2,40	2,50	2,45	2,50	2,60	2,40	2,45	2,35
	Falangina	2,20	2,25	2,30	2,25	2,00	2,45	2,20	2,00
	Falange	4,65	5,00	5,10	4,50	5,20	4,90	4,80	5,40
Índice	Falangeta	2,30	2,20	2,24	2,50	2,35	2,40	2,50	2,45
	Falangina	1,80	2,30	2,35	1,90	2,50	2,30	2,00	2,30
	Falange	4,10	4,00	4,30	4,25	4,50	4,30	4,40	4,20
Pulgar	Falangeta	2,35	2,50	2,40	2,50	2,70	2,80	2,40	2,50
	Falangina	3,95	4,20	4,30	4,00	4,50	4,40	4,00	4,40

Fuente: Autores

El percentil utilizado fue de P=95, todos los cálculos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6. Cálculos con un percentil de P95

Dedo	Nombre	Promedio [cm]	σ[cm]	P95 [cm]
Meñique	Falangeta	1,97	0,0845	2,11
	Falangina	1,90	0,0729	1,97
	Falange	3,65	0,1294	3,86
Anular	Falangeta	1,90	0,1474	2,14
	Falangina	2,00	0,1731	2,18
	Falange	4,25	0,2154	4,60
Medio	Falangeta	2,40	0,0776	2,52
	Falangina	2,20	0,1499	2,44
	Falange	4,65	0,2945	5,13
Índice	Falangeta	2,30	0,1147	2,48
	Falangina	1,80	0,2478	2,20
	Falange	4,10	0,1591	4,36
Pulgar	Falangeta	2,35	0,1557	2,60
	Falangina	3,95	0,2137	4,30

Fuente: Autores

La capacidad de movilidad de cada uno de los dedos permite la manipulación y ejecución de movimientos en trabajos de alto riesgo.

Con ayuda de estas tablas se diseñara todas las partes del brazo inalámbrico.

CAPÍTULO IV

4. MODELACIÓN MATEMÁTICA, ANÁLISIS CINEMÁTICO

Del estudio del movimiento de los sistemas mecánicos se encarga la Cinemática, misma que es considerada como parte de la física y en la cual las fuerzas no son consideradas y por ende, en esta parte los efectos de las mismas en los materiales no intervienen. La capacidad de movilidad de cada uno de los dedos permite la manipulación y ejecución de movimientos en trabajos de alto riesgo. Al no participar las fuerzas, el análisis de los sistemas será más sencillos por cuanto no se considera ecuaciones diferenciales para su modelación, a esta parte de la física encargado del estudio de los sistemas mecatrónicas y robots manipuladores se denomina cinemática directa.

La cinemática del brazo inalámbrico será analizado como:

Problema cinemático directo: metodología que permitirá determinar la posición y orientación del extremo final del brazo inalámbrico, considerándose un sistema de coordenadas de referencia que será el hombro, una vez calculado los ángulos de las articulaciones y los parámetros geométricos dimensiones del brazo humano promedio y trasladados como elementos del brazo manipulador.

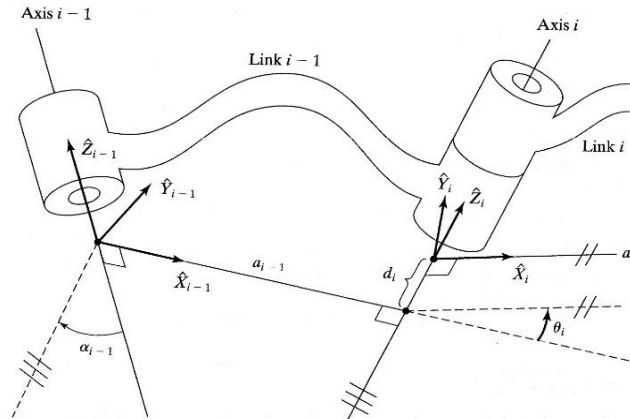
Problema cinemático inverso: metodología que permitirá determinar la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas (CIN-ROB, 2013).

Modelo diferencial (matriz Jacobiana): Relaciones entre las velocidades tanto lineales como angulares de movimiento de las articulaciones y las del extremo del brazo manipulador, conocido también como cinemática diferencial directa, es decir, es la derivada con respecto al tiempo de la cinemática directa.

Convención Denavit-Hartenberg. El método de Denavit-Hartenberg es ampliamente empleado en esta área de la ingeniería, por cuanto, permite a través de un procedimiento sencillo obtener el modelo cinemático directo cuya estructura queda en término de transformaciones directas.

El método de Denavit-Hartenberg consiste en determinar una tabla de parámetros relacionados con los eslabones de los robots, cuyas especificaciones para la interrelación se presenta en la figura, donde las variables articulares se representan por θ_i para el tipo rotacional, d_i hace el papel de representar al ancho del servomotor en la articulación rotacional más el espesor de la placa en este caso denotado por α_i .

Figura 26. Convención de Denavit-Hartenberg para un robot manipulador



Fuente: Introduction to Robotics Mechanics and Control

Donde:

a_i = distancia desde el eje Z_i to Z_{i+1} a lo largo del eje X_i

α_i = ángulo formado desde el eje Z_i a Z_{i+1} medido alrededor del eje X_i

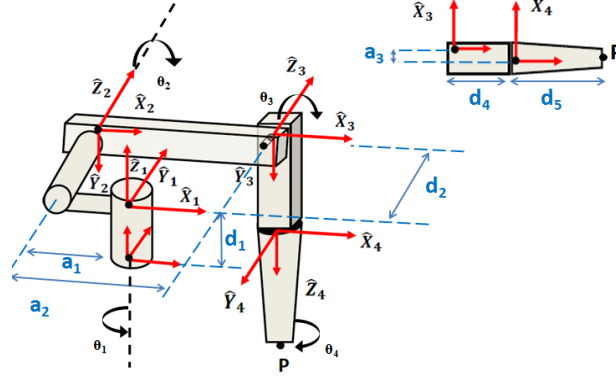
d_i = la distancia desde el eje X_{i-1} a X_i a largo del eje Z_i

θ_i = El ángulo medido desde el eje X_{i-1} hasta X_i a lo largo del eje Z_i

Adicionalmente para la definición de las variables tanto para la localización como para la rotación en cada una de las coordenadas de las articulaciones son requeridas de acuerdo a la orientación con respecto a la siguiente articulación. El eje Z de la articulación $\{i\}$ denominada Z_i debe ser coincidente con la junta del eje i . Los puntos X_i a lo largo de a_i en la dirección desde la unión i a la unión $i+1$. Y_i es tomado de acuerdo a la regla de la mano derecha para completar la unión i .

El diagrama de la selección de las coordenadas en este caso para 4 transformaciones correspondiente a una parte del brazo inalámbrico de 4 grados de libertad es mostrado en la figura 27. La tabla 7 presenta las uniones correspondientes a los parámetros asociados con cada coordenada de las articulaciones.

Figura 27. Coordenadas de las articulaciones asociadas a los parámetros



Fuente: Introduction to Robotics Mechanics and Control

Tabla 7. Parámetros de enlace Denavit-Hartenberg

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	d_1	θ_1
2	-90	$-a_1$	d_2	θ_2
3	0	a_2	0	θ_3
4	-90	a_3	d_4	θ_4

Fuente: Introduction to Robotics Mechanics and Control

Utilizando los parámetros de enlace de la tabla 8, la matriz de transformación es formada, la misma que describe la rotación y la traslación de las coordenadas de la articulación i con relación a la coordenada de la articulación $i-1$. La ecuación (3) resultado de la transformación T , desde i a $i-1$ se presenta de la siguiente forma.

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Empleando la definición de la transformación general de la ecuación (2), se determina las matrices de transformaciones para cada coordenada de las articulaciones, las cuales son presentadas a continuación, en este desarrollo se considera los parámetros de la tabla 8.

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & a_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ -\sin \theta_4 & -\cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Para describir el comportamiento del punto extremo final P en relación con las coordenadas globales de las articulaciones se alcanza multiplicando todas las matrices de transformación:

$${}^0_5T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T \quad (9)$$

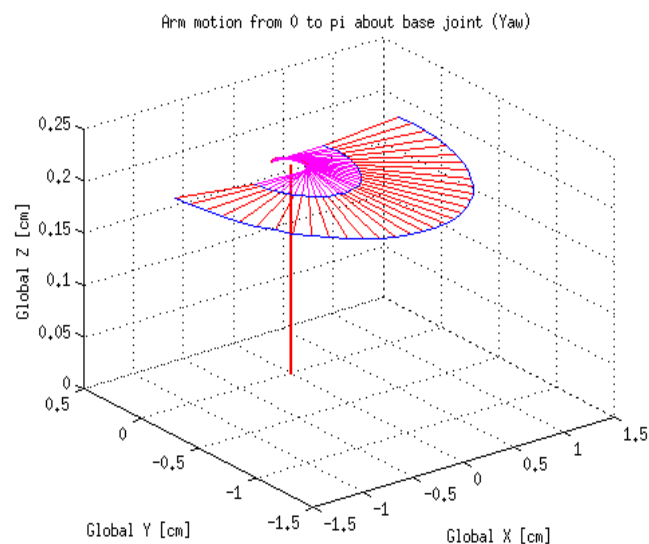
Cada índice de la matriz resultante está representado por una rotación, r_{ii} , o por el pnto de coordenadas P_i . Esto es bastante útil, por cuanto al realizar estas sustituciones las ecuaciones extremadamente extensas son reemplazadas por cada índice de la matriz de transformación final. La ecuación 10 representa las coordenadas globales del brazo inalámbrico en el punto final P mostrado en la Figura 27. Las variables P_X , P_Y , and P_Z corresponden a las coordenadas globales X, Y, y Z.

$${}^0_5T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_X \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_Y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} P_X &= c\theta_1[-a_1 + a_2c\theta_2 + a_3\cos\theta_{23} - s\theta_{23}d_5 - d_4s\theta_{23}] - d_2s\theta_1 \\ P_Y &= s\theta_1[-a_1 + a_2c\theta_2 + a_3\cos\theta_{23} - d_4s\theta_{23} - s\theta_{23}d_5] + c\theta_1d_2 \\ P_Z &= d_1 - c\theta_{23}d_5 - d_4c\theta_{23} - a_3s\theta_{23} - a_2s\theta_2 \end{aligned} \quad (11)$$

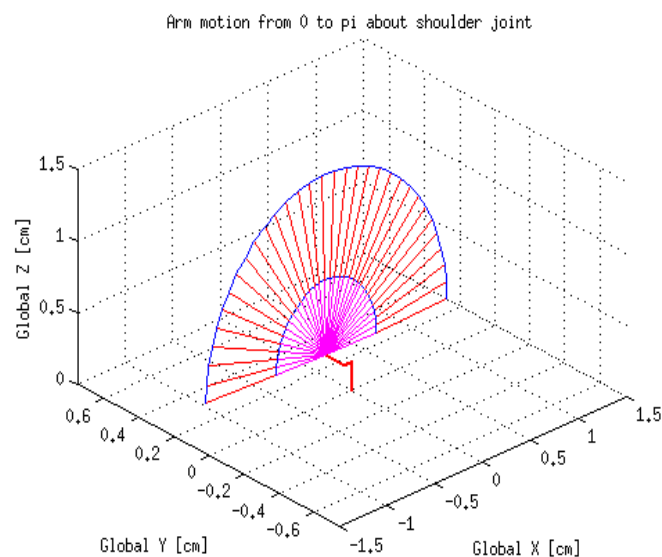
Una vez que la descripción de la cinemática directa ha sido aplicado al brazo manipulador, es útil proceder con la verificación de la matemática para cada ángulo de las articulaciones, las mismas que serán variadas en rangos desde 0 a π , esto con la finalidad de confirmar que el extremo del brazo robótico muestre comportamientos adecuados con respecto a las coordenadas globales. Las figuras 28 y 29 que se presentan a continuación nos permiten validar el proceso.

Figura 28. La variación del movimiento de la articulación de rotación de 0 a π , el hombro constante a 90 grados, y el codo constante a cero grados, permite ilustrar el movimiento del brazo.



Fuente: Introduction to Robotics Mechanics and Control

Figura 29. Variación del movimiento del hombro de 0 a π , codo y la articulación de rotación permanecen a cero grados.



Fuente: Introduction to Robotics Mechanics and Control

4.1 Análisis dinámico

El Análisis dinámico, permite conocer los parámetros físicos de las velocidades y aceleraciones así como de los esfuerzos, esto permite establecer aspectos del brazo inalámbrico como tipo de material, rendimiento del mecanismo y potencia de los actuadores.

En relación al cómputo de los esfuerzos se determinan los valores de esfuerzos de tensión (eslabones), esfuerzos cortantes (sujetadores, pernos) de torsión (para seleccionar el servomotor), flexión pura y simulación con FEM para comprobar que la selección del material cumple con el requerimiento de diseño.

Los movimientos del brazo para determinar los aportes de ángulos y velocidades de las articulaciones, es decir comprobar el análisis cinemático de posiciones y campo de acción, es estimado en Matlab.

4.1.1 Tornillos de potencia. Los tornillos, como elementos de sujeción o de unión entre piezas, constituyen uno de los componentes más utilizados en el diseño de todo tipo de estructuras y máquinas.

Figura 30. Tornillos



Fuente: <http://goo.gl/xzer8P>

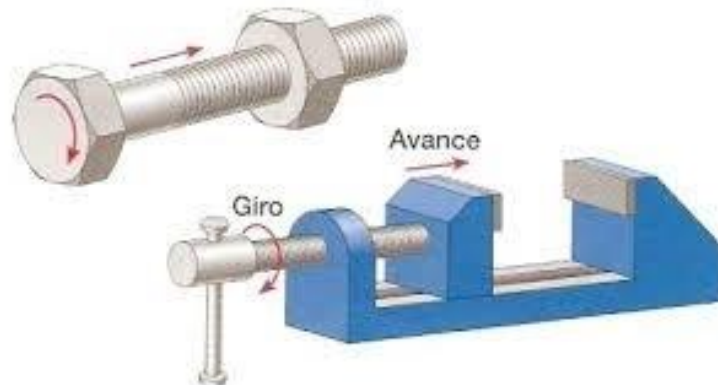
En función de la misión que cumplen, los tornillos se pueden clasificar en tornillos de unión y tornillos de potencia.

Por un lado, los tornillos de unión, los que comúnmente se conoce, se emplean para unir o asegurar dos o más partes estructurales de una máquina o estructura, y pueden ser de distintos tipos:

- Tornillos de cabeza
- Tornillos prisioneros o de fijación
- Pernos
- Espárragos, etc.

Por otro lado, los tornillos de potencia, son aquellos destinados a la transmisión de potencia y movimiento, y que generalmente se utilizan para convertir un movimiento angular o de giro, en un movimiento de traslación o lineal, acompañado además de una transmisión de esfuerzo.

Figura 31. Tornillos de potencia



Fuente: <http://goo.gl/xzer8P>

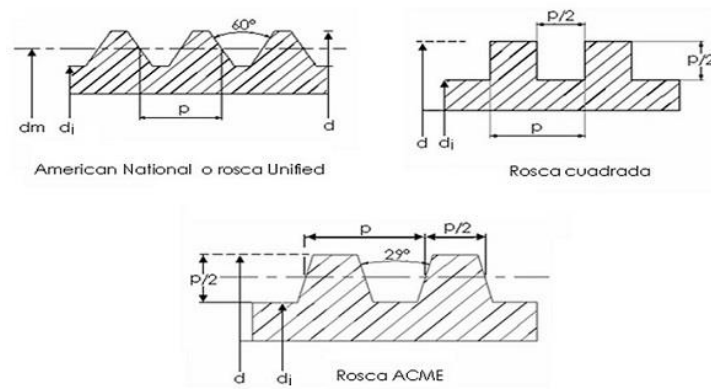
Los tornillos de potencia se usan en muchas aplicaciones, como tornillos de avance en máquinas herramientas, mordazas, gatos mecánicos para elevación de vehículos, prensas y otros dispositivos de elevación de cargas, máquinas universales de tracción y compresión, etc.

En este sentido, es muy usual el empleo de mecanismos constituidos por tornillos de potencia para la elevación o traslado de cargas, debido a que permiten desarrollar grandes fuerzas a lo largo de su eje.

4.1.1.1 Tipos de roscas. En tornillos de potencia, las roscas más empleadas en el fileteado del tornillo son la rosca cuadrada, la rosca ACME y la rosca Unificada.

A continuación, y de manera esquemática, la siguiente figura muestra los tipos de roscas más empleadas para su visualización.

Figura 32. Tipos de roscas

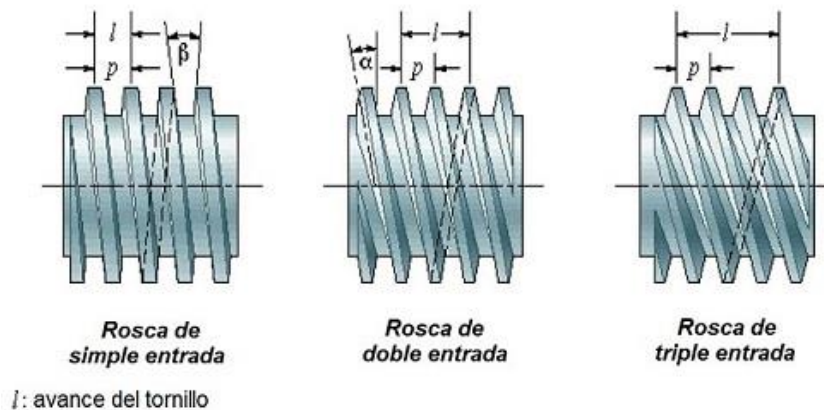


Fuente: <http://goo.gl/xzer8P>

Aunque la rosca cuadrada es la que posee mayor rendimiento y eficiencia, se prefiere principalmente la rosca ACME con ángulo de 29° por el buen ajuste que consigue este tipo de rosca.

Además, otro factor que influye es que la rosca cuadrada no está normalizada, mientras que tanto la rosca ACME como la Unificada sí lo están, lo que permite su fácil construcción mediante todos los procedimientos existentes de fabricación.

Figura 33. Avance de rosca

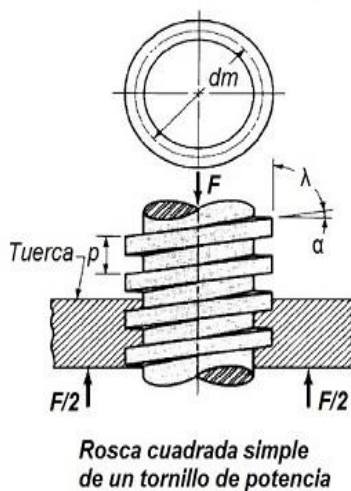


Fuente: <http://goo.gl/xzer8P>

4.1.1.2 Cálculo de tornillos de potencia. Una de las aplicaciones más habituales de los tornillos de potencia es la fabricación de mecanismos para la elevación de carga.

En este apartado se van a mostrar las distintas expresiones matemáticas que se utilizan para calcular el par torsional necesario para hacer girar al tornillo en la elevación o descenso de una carga (F).

Figura 34. Rosca cuadrada



Fuente: <http://goo.gl/xzer8P>

Para ello, primero es necesario conocer el conjunto de esfuerzos que actúan sobre el tornillo de potencia. Para el cálculo de estos esfuerzos se parte de las ecuaciones de equilibrio de fuerzas que gobiernan el mecanismo.

A continuación se adjuntan algunos de los parámetros que servirán para definir las características de un tornillo de potencia:

α = ángulo de hélice

λ = ángulo de avance

p = paso o avance del tornillo

d_m = diámetro medio del tornillo (también denominado diámetro primitivo)

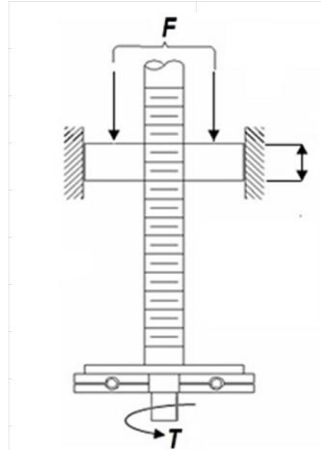
F = suma de todas las fuerzas axiales que actúan sobre el tornillo (representa la carga a elevar o descender)

P = fuerza necesaria a aplicar al tornillo para vencer la fuerza de rozamiento y hacer ascender/descender la carga por el plano inclinado de la rosca del tornillo.

$$T = \frac{F \cdot d_m}{2} * \frac{\rho + \pi \cdot \mu \cdot d_m \cdot \sec \theta}{\pi \cdot d_m - \mu \cdot \rho \cdot \sec \theta} \quad (12)$$

Cálculos del tornillo de potencia del brazo inalámbrico.

Figura 35. Tornillo cálculos



Fuente: <http://goo.gl/xzer8P>

Tabla 8. Datos para cálculo de carga a levantar

Descripción	Datos		Unidades
Torque Servomotor	T	21,44	lb*plg
Carga a levantar	F	?	lb
Diámetro medio	dm	0,85	plg
paso o avance del tornillo (0,4)	p	1,60	plg
Coefficiente rozamiento rosca	μ	0,30	
Angulo de hélice de rosca	Θ	14,50	°

Fuente: Autores

$$F = \frac{2T * (\pi * d_m - \mu * p * \sec \theta)}{d_m * (\rho + \pi * \mu * d_m * \sec \theta)} \quad (13)$$

$$F = \frac{2(21,44 \text{ lb} * \text{plg}) * (3,14159 * 0,85 \text{ plg} - 0,30 * 1,60 \text{ plg} * 1,033)}{0,85 \text{ plg} * (1,60 \text{ plg} + 3,14159 * 0,30 * 0,85 \text{ plg} * 1,033)}$$

$$F = 45,19 \text{ lb}$$

4.1.1.3 Fuerzas de levantamiento. La fuerza de levantamiento es la fuerza utilizada con la mano para apretar o suspender objetos en el aire.

Al aplicar la fuerza en la dirección correcta y en la posición debida evita el desarrollo de trastornos y la aparición de lesiones durante la aplicación de la fuerza. Para calcular la fuerza efectiva se ha de calcular con la aplicación de la fórmula del momento de fuerza.

$$M = F * OFg * \text{sen } \alpha \quad (14)$$

M = Momento de fuerza

F = Fuerza

OFg = Brazo de palanca

α = Angulo de movimiento

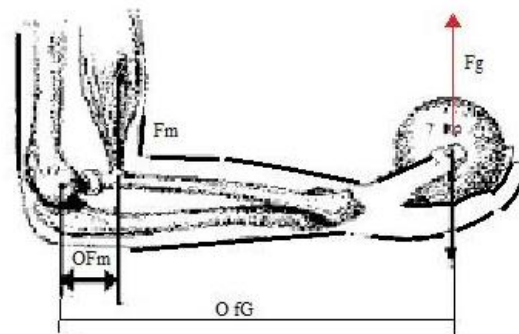
Cuando el seno de alfa tiene un valor unitario entonces se llega al momento máximo antes de este valor y posteriormente se obtiene valores menores de fuerza.

En el caso del brazo inalámbrico la fuerza se encuentra delimitada por la capacidad de desplazamiento de los servomotores, el servomotor ubicado en el codo será el que mayor fuerza ejerza para levantar toda la estructura, la unión entre el antebrazo y el bíceps actúa como punto de contacto.

Calculo de fuerza de levantamiento.

Las longitudes y datos necesarios para el cálculo se muestran en la siguiente figura y tabla.

Figura 36. Longitudes para determinar la fuerza de levantamiento



Fuente: <http://goo.gl/xzer8P>

Tabla 9. Datos

Descripción	Datos		Unidades
Fuerza Servomotor	Fm	45,19	lb
Carga a levantar	Fg	?	lb
Distancia Ofm	Ofm	3,00	cm
Distancia Ofg	Ofg	36,50	cm

Fuente: Autores

$$F_g = \frac{F_m * OF_m}{OF_g} \quad (15)$$

Tabla 10. Resultados

RESULTADO		
Fg (calc)	3,71	lb
Fg (real)	3,35	lb

Fuente: Autores

En la tabla se aprecia el resultado de la carga máxima calculada y real a levantar.

4.2 Diseño del brazo robótico

Para la construcción de la carcasa del brazo inalámbrico mediante impresión 3D, se realizó el dibujo tridimensional en SolidWorks de cada uno de sus partes llegando a obtener 48 elementos.

Determinándose además el cálculo del centro de masas, efectos inerciales, selección del material, cálculo de espesor de la carcasa, fuerzas centrípetas, par gravitacional y de fricción, análisis estático y el ensamble; esto por cuanto resulta más práctico que utilizar ecuaciones del movimiento de Euler Lagrange.

4.2.1 Cálculos de grados de libertad del brazo inalámbrico. Para deducir los grados de libertad se considera la estructura completa del brazo inalámbrico, los grados de libertad se calcularan mediante la aplicación de la fórmula de Grübler-Kutzbach, se deberá determinar el número de eslabones y el tipo de junta del mecanismo.

- Eslabón: es cuerpo rígido que posee al menos dos nodos, que son los puntos de unión con otros eslabones.
- Junta o par: Conexión entre dos o más eslabones que permite algún movimiento o movimiento potencial entre los eslabones conectados para transmitir el movimiento entre los mismos.

$$M = 3(L - 1) - 2J1 - J2 \quad (16)$$

Dónde:

M = grados de libertad.

L = número de eslabones.

J1 = número de junta de 1 grado de libertad.

J2 = número de junta de 2 grados de libertad.

En la siguiente tabla se especifica cada elemento presente en los subconjuntos del brazo inalámbrico.

Tabla 11. Numero de eslabones y uniones

Numero de eslabones y uniones			
Nombre	L	J1	J2
Meñique	3	3	0
Anular	3	3	0
Medio	3	3	0
Índice	3	3	0
Pulgar	2	2	0
Muñeca	1	1	0
Antebrazo	1	1	0
Brazo	1	1	0
Hombro	1	0	0

Fuente: Autores

En el hombro se tomó un valor de 0 en J1 por considerarse como el primer elemento de la estructura (unión al suelo).

Con los datos obtenidos se aplica en la formula.

$$M = 3(18 - 1) - 2(17) - 0$$

M= 17 grados de libertad.

El brazo robótico está diseñado con 17 grados de libertad lo cual permite alcanzar un gran espacio de trabajo. Los grados de libertad del brazo robótico son: 14 en los dedos, un grado en la articulación de la muñeca de rotación, uno en la articulación del codo para el movimiento del antebrazo, otro en el hombro para el movimiento de toda la estructura.

4.2.2 *Comparación del diseño con la mano humana.* En la figura se hace una comparación de una mano humana con las partes de la mano de nuestra investigación, se observa que tienen gran similitud, esto es esencial para una mejor manipulación de objetos.

Figura 37. Comparación de una mano humano



Fuente: Autores

4.2.3 *Clasificación por subconjuntos.* El brazo está dividido en subconjuntos, estos subconjuntos a su vez formado por diversas piezas que ensambladas en su totalidad formaran el brazo inalámbrico completo.

Los subconjuntos están clasificados desde la parte inferior hasta la parte superior del prototipo de la siguiente manera:

- Mano (palma, dedos)
- Muñeca
- Antebrazo
- Bíceps
- Hombro

En la siguiente tabla se muestra los nombres de todas las piezas clasificadas en subconjuntos. En el anexo A se muestran las formas de cada una de las piezas.

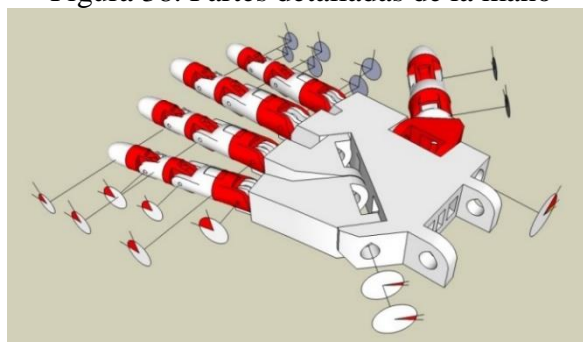
Tabla 12. Subconjuntos

Mano	Muñeca	Antebrazo	Bíceps	Hombro
Dedo Meñique	Rotación de la muñeca 1	Tapa superior de brazo 3	Tuerca de potencia	Placa lateral hombro tórax 1
Dedo Pulgar	Rotación de la muñeca 2	tapa superior de brazo 4	Tornillo de potencia	Tapa placa hombro tórax
Dedo Índice	Rotación de la muñeca 3	tapa superior de brazo 2	Soporte servo	Placa hombro tórax
Dedo Medio	Engranajes de la muñeca	tapa superior de brazo 5	Base servo v1	
Dedo Anular	Soporte de cable	Placa antebrazo	Placa servo	
Base muñeca larga		Polea del servo	Reforzador	
Base muñeca pequeña		Guía para cables posteriores	Tapa superior del brazo	
Cubierta de dedo		Cama servomotores	Tapa inferior del brazo	
Superficie superior de la mano		Guía para cables frontales	Engranaje del eje del codo	
Tornillo espaciador		Placa inferior hombro	Engranaje de potenciómetro	
Soporte de Arduino		Placa lateral hombro	Tapa superior de brazo 1	
		Engranaje giro hombro	Tapa superior de brazo 2	
		Tornillo de potencia hombro	Tapa superior de brazo 3	
		Placa de potenciómetro	Soporte de engranaje	
		Placa superior hombro		

Fuente: Autores

4.2.3.1 Mano. Es el componente más importante de nuestra investigación por ser el principal medio de manipulación, está diseñada para simular los movimientos y agarres de una mano humana, la mano está compuesta al igual que una mano humana por palma y dedos, cada elemento está diseñado por varias piezas que se unirán y formaran el subconjunto.

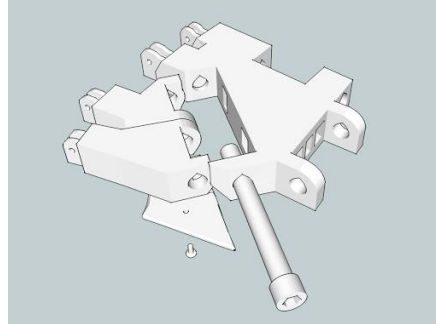
Figura 38. Partes detalladas de la mano



Fuente: Autores

4.2.3.2 Palma. La palma de la mano es una superficie plana, donde se colocaran los dedos, está compuesta por 3 partes, una parte principal que es más grande que será estática donde se colocaran las dos piezas restantes con un perno para permitir la movilidad del dedo meñique y anular, tiene 2 agujeros en el extremo para poder acoplar la palma con la muñeca.

Figura 39. Diseño de la palma



Fuente: Autores

4.2.3.3 Dedos. Para el tamaño de los dedos se tomó como referencia el tamaño promedio de la mano humana en el capítulo tres se realizó una recolección de datos, de este estudio se parte para determinar las dimensiones de cada dedo. Se calcularon las medidas con un percentil de P=95, en la siguiente tabla se muestran los datos calculados.

Tabla 13. Datos obtenidos

Dedo	Nombre	Promedio [cm]	σ [cm]	P95 [cm]
Meñique	Falange	1,975	0,0845	2,11
	Falangina	1,900	0,0729	1,97
	Falange	3,650	0,1294	3,86
Anular	Falange	1,900	0,1474	2,14
	Falangina	2,000	0,1731	2,18
	Falange	4,250	0,2154	4,60
Medio	Falange	2,400	0,0776	2,52
	Falangina	2,200	0,1499	2,44
	Falange	4,650	0,2945	5,13
Índice	Falange	2,300	0,1147	2,48
	Falangina	1,800	0,2478	2,20
	Falange	4,100	0,1591	4,36
Pulgar	Falange	2,350	0,1557	2,60
	Falangina	3,950	0,2137	4,30

Fuente: Autores

Se realiza una comparación entre los datos obtenidos teóricamente y los datos del diseño, se observa que las dimensiones del diseño son más grandes, pero están en el rango calculado es decir que se asemeja a las dimensiones del promedio de los dedos y mano.

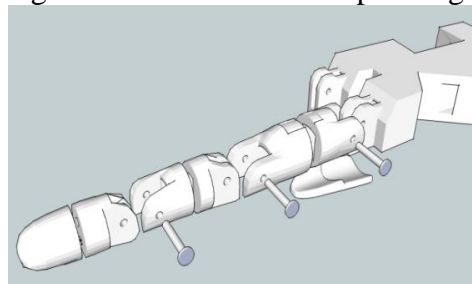
Tabla 14. Comparación de medidas

Comparación de medidas			
Dedo	Nombre	Calculadas	Diseñadas
		Longitud [cm]	Longitud [cm]
Meñique	Falangeta	2,11	2,20
	Falangina	1,97	2,00
	Falange	3,86	4,20
Anular	Falangeta	2,14	2,40
	Falangina	2,18	2,20
	Falange	4,60	4,60
Medio	Falangeta	2,52	2,70
	Falangina	2,44	2,50
	Falange	5,13	5,20
Índice	Falangeta	2,48	2,50
	Falangina	2,20	2,20
	Falange	4,36	4,80
Pulgar	Falangeta	2,60	2,60
	Falangina	4,30	4,70

Fuente :Autores

Cada dedo es similar a un dedo humano, los dedos están compuestos por 6 piezas, 2 piezas unidas entre sí forman una falange falangina y falangeta respectivamente a excepción del dedo pulgar que no tiene falangina en este caso el pulgar está compuesto por 5 piezas formando en piezas de dos una falange y falangeta y la piezas restantes nos sirve para dar mayor movilidad al dedo.

Figura 40. Articulaciones tipo bisagra



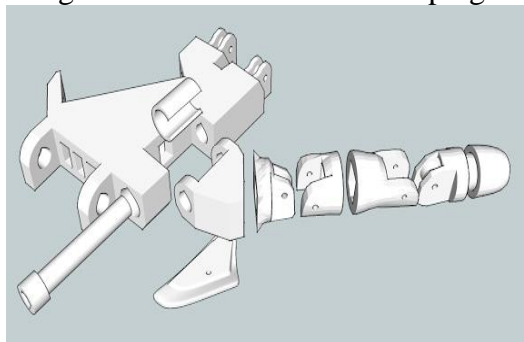
Fuente: Autores

Cuatro de los cinco dedos están orientados a un mismo plano, tienen tres grados de libertad que permiten los movimientos de flexión y extensión, las falanges de cada dedo están acopladas mediante articulaciones tipo bisagra como se muestra en la figura 40.

- **Dedo pulgar.**

El quinto dedo el pulgar tiene la misma configuración de los otros dedos, a diferencia de su posición que varía respecto al plano de la mano. El dedo pulgar es un dedo importante, se lo utiliza especialmente para lograr presión en los objetos

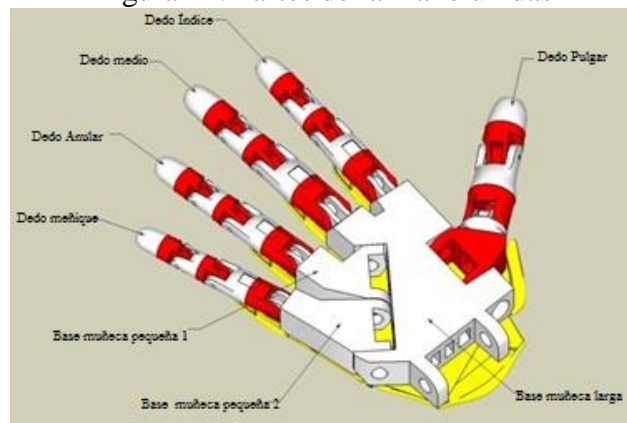
Figura 41. Estructura del dedo pulgar



Fuente: Autores

En la figura 42 las piezas se encuentran unidas formando cada uno de los dedos, en color rojo se aprecia las articulaciones de cada dedo para permitir un movimiento que se asemeje más al de una mano humana. Del correcto movimiento de los dedos dependerá el agarre óptimo de los objetos, los dedos deben moverse libremente sin ninguna restricción ni roce

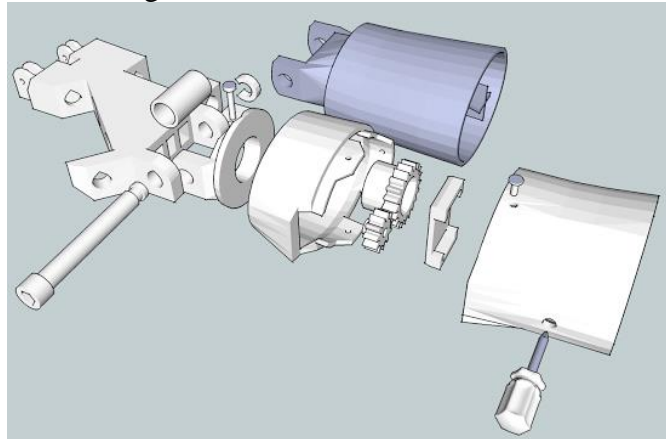
Figura 42. Partes de la mano unidas



Fuente: Autores

4.2.3.4 Muñeca. Es la unión entre la mano y el antebrazo, la muñeca humana tiene cinco movimientos nuestro prototipo tiene un grado de libertad con dos movimientos pronación (palma hacia abajo) y supinación (palma hacia arriba), son movimientos rotacionales sobre el eje del antebrazo, se colocara un servomotor de 180° para lograr estos movimientos, además un sistema de engranajes de 3 ruedas dentadas.

Figura 43. Estructura de la muñeca



Fuente: Autores

4.2.3.5 Antebrazo. Para las dimensiones del antebrazo al igual que los dedos en el capítulo tres se determinaron las dimensiones más representativas. En el siguiente cuadro se observa una comparación de dimensiones.

Tabla 15. Comparación de medidas del antebrazo

Nombre de las Medidas	Comparación de medidas	
	Calculadas [cm]	Diseñadas [cm]
Longitud de la mano	19,94	20.40
Alcance mínimo del brazo hacia delante con agarre	38,69	45,00
Alcance máximo del brazo hacia delante con agarre	64,94	72.30
Largo del brazo a 90° con respecto a la pared	85,37	83.20
Diámetro de agarre interior	6,49	7,00
Longitud del antebrazo	30,19	33,00

Fuente: Autores

El antebrazo tendrá un grado de libertad y dos movimientos verticales al igual que la mano los movimientos serán de flexión y extensión, este movimiento se lograra con la ayuda de un servomotor colocado al final del antebrazo con un sistema de engranajes y de tornillo de potencia que simulara la articulación del codo.

En el brazo se ensamblara el subconjunto de la muñeca, en su interior se colocaran servomotores para los movimientos de los dedos.

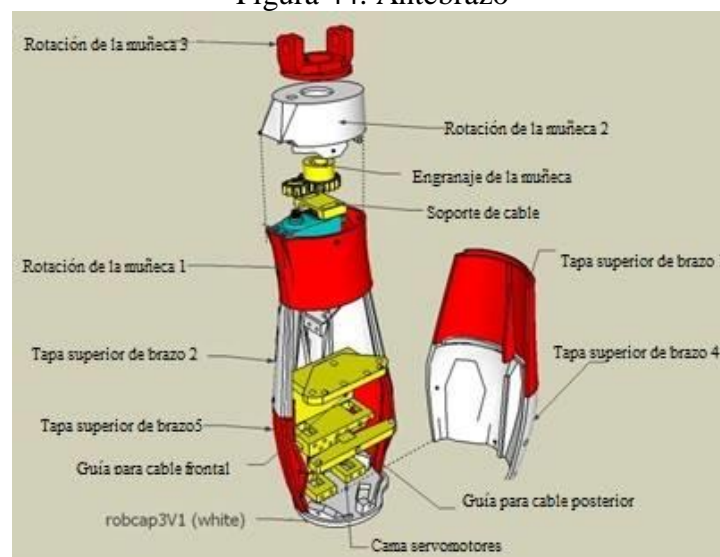
El antebrazo está formado por una serie de piezas. Las nombraremos de acuerdo a la figura 46 de arriba hacia abajo, rotación de la muñeca 3 servirá para acoplar la palma de la mano con la muñeca y permitirá que la mano gire.

Rotación de la muñeca 2 es donde se colocaran los engranajes que lograra la movilidad de la mano, los 2 engranajes de la muñeca se acoplaran entre sí para permitir la rotación, por el soporte de cable de la muñeca se introducirán los cables del servomotor.

Dentro de la rotación de la muñeca 1 se colocara el servomotor, la tapa superior del brazo 1 es una base para colocar las piezas en donde irán montados los servomotores, esta pieza es además la mitad de la estructura exterior del antebrazo, la guía para cables tiene agujeros para permitir el paso de cables hacia los dedos para permitir su movilidad.

En la cama de servomotores se colocaran los 5 servomotores necesarios para mover los dedos, las tapas superiores del brazo 4 y 5 van unidas entre sí y son la estructura externa del antebrazo además de cubrir los servomotores y otros componentes.

Figura 44. Antebrazo



Fuente: Autores

En la figura en color amarillo se puede apreciar de mejor manera las piezas que servirán para montar los servomotores y cables.

Todas las piezas se unen formando una estructura compacta que permitirá la manipulación de los servomotores y los cables una vez se ensamblen todos los componentes como se muestra en la figura.

Figura 45. Ensamble del antebrazo



Fuente: Autores

4.2.3.6 Brazo (bíceps). A diferencia de los otros subconjuntos el bíceps no tiene un movimiento propio, cumple un papel importante en el movimiento de la estructura del brazo robótico del correcto movimiento del bíceps dependerá también la precisión en la manipulación de los objetos.

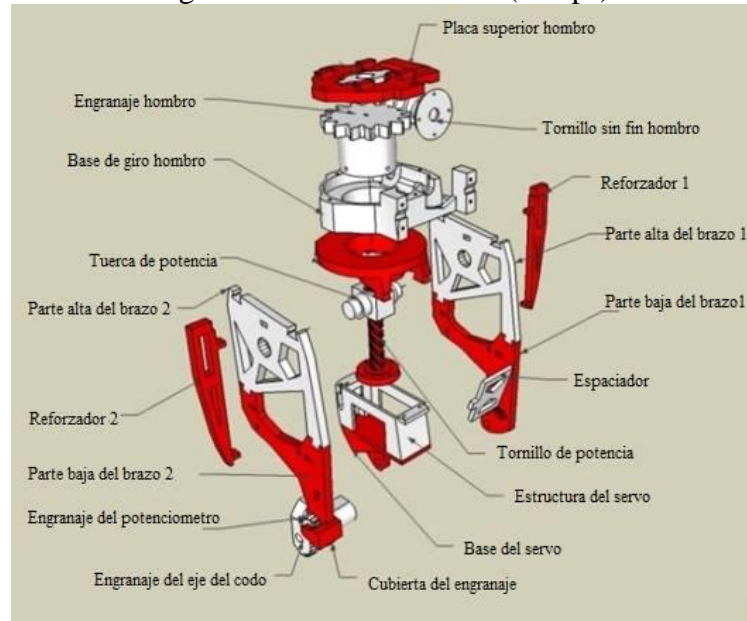
El movimiento del bíceps está relacionado con los grados de libertad del hombro, el antebrazo se moverá junto con el bíceps, los movimientos serán: flexión y extensión.

La estructura debe ser compacta para soportar las cargas y el peso del brazo, además se debe considerar el peso de la estructura del brazo con los objetos manipulados.

Es una estructura un tanto compleja, se diferencia de las otras partes por tener un tornillo de potencia para cambiar el sentido de movimiento de los servomotores, en la parte inferior se puede apreciar el engranaje del eje del codo para permitir el movimiento simulando a la articulación con la ayuda de un servomotor.

Las piezas están diseñadas para que el bíceps sea lo más liviano posible, todas las piezas se aprecian en la figura.

Figura 46. Piezas del brazo (bíceps)



Fuente: Autores

En la figura 47 las piezas están ensambladas, su estructura es compacta y brinda las protecciones para los mecanismos de tornillos de potencia, al igual que la mano y el antebrazo en este subconjunto también se colocaran protectores exteriores para ocultar los mecanismos y mejorar la estética.

El movimiento del antebrazo depende del sistema de tornillo de potencia del bíceps.

Figura 47. Estructura completa del brazo

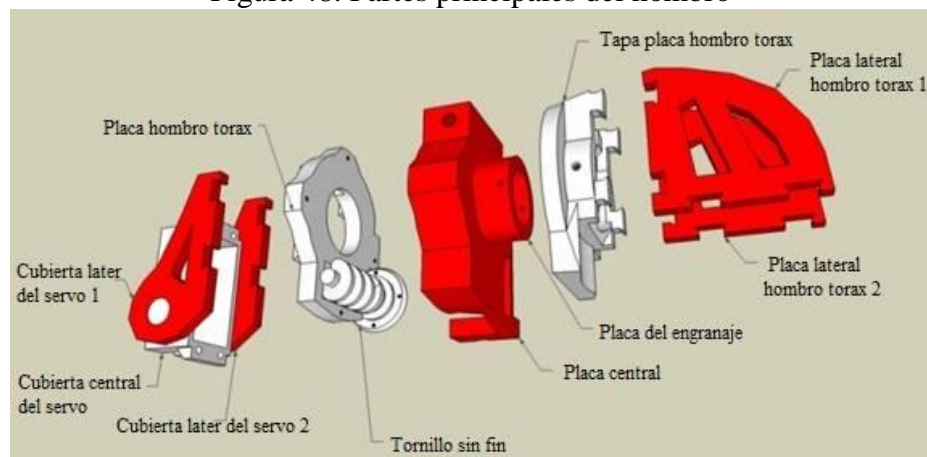


Fuente: Autores

4.2.3.7 Hombro. Es la articulación más móvil de todo el cuerpo humano. El hombro es el subconjunto final, es donde se colocara y soportara todo el peso del brazo robótico, tendrá un grado de libertad, los movimientos serán de flexión y extensión. Con el movimiento del hombro también se moverá toda la estructura del brazo robótico

Tiene una estructura similar al antebrazo, está compuesto por 9 piezas, estas piezas permitirán el movimiento del brazo de una manera más real, está compuesto por tornillos sin fin para cambiar el movimiento.

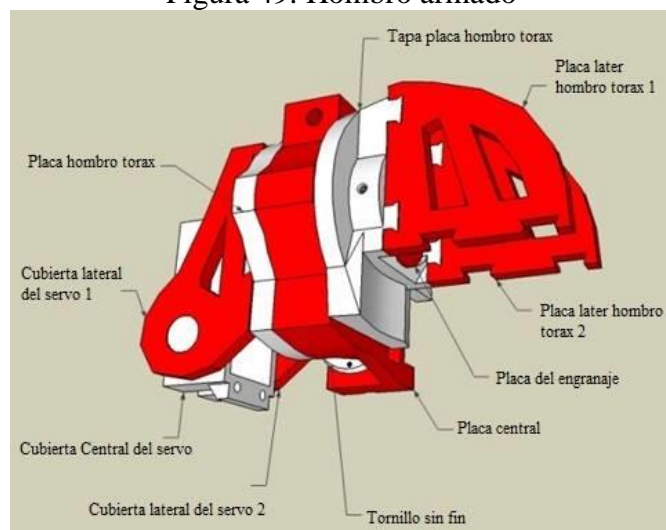
Figura 48. Partes principales del hombro



Fuente: Autores

El hombro es la parte final de nuestra estructura, se acoplará a un tubo de sección circular con un cilindro de nylon donde se sujetará toda la estructura con tornillos.

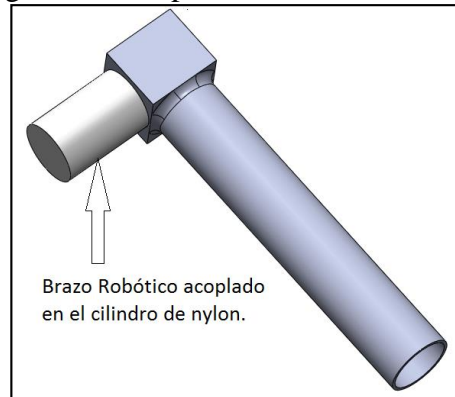
Figura 49. Hombro armado



Fuente: Autores

La estructura final está formada por un cuadrado y un tubo de acero inoxidable acoplado mediante un perno a un cilindro de nylon. El tubo de acero inoxidable se montara en un pedestal para estabilizar el brazo robótico.

Figura 50. Acople del brazo inalámbrico



Fuente: Autores

4.3 Selección de material

Para la selección del material empleado en la construcción del brazo robótico se tomara en cuenta los siguientes criterios:

- Análisis de los diferentes materiales existentes en el mercado y sus propiedades.
- Se utilizara la tecnología FDM (modelado por deposición fundida).
- Compatibilidad de los materiales con la impresora
- El material debe ser lo más liviano posible, sin dejar de lado la resistencia debido a las cargas y pesos que estará sometido el brazo robótico.
- Costo
- El material debe ser seguro para las personas y amigable con el medio ambiente.

Partiendo de estos criterios se utiliza una investigación en portales web para conocer las distintas empresas que ofrecen la comercialización de materiales (filamentos) de impresoras 3D en el país.

Al contactar con diferentes empresas se concluye que en el mercado nacional existen dos materiales que predominan y pueden ser adquiridos con facilidad, estos materiales son ABS y PLA, se hará un análisis manteniendo los criterios antes mencionados para seleccionar la mejor alternativa entre estos dos materiales.

Tabla 16. Propiedades mecánicas y físicas (ABS, PLA)

Material	Densidad [g/cm³]	Resistencia a la rotura [Kg/cm²]	Temperatura de fusión [°C]
ABS	1,07	450-750	215 - 250
PLA	1,50 -1,64	0	160 -230

Fuente: Autores

En la tabla 17 se puede apreciar las propiedades mecánicas de los dos materiales, tienen una ligera variación en la densidad, El ABS es más resistente, pero el PLA también ofrece buenas propiedades para el brazo robótico.

En cuanto a la compatibilidad de los materiales no hay ningún inconveniente los dos materiales presentan dimensiones y características compatibles con la impresora.

Costo. Debido al alto número de piezas y a la variación de colores que se imprimirán se escogerá un material económico para abaratar costos de fabricación, entre los dos materiales el más económico es el PLA.

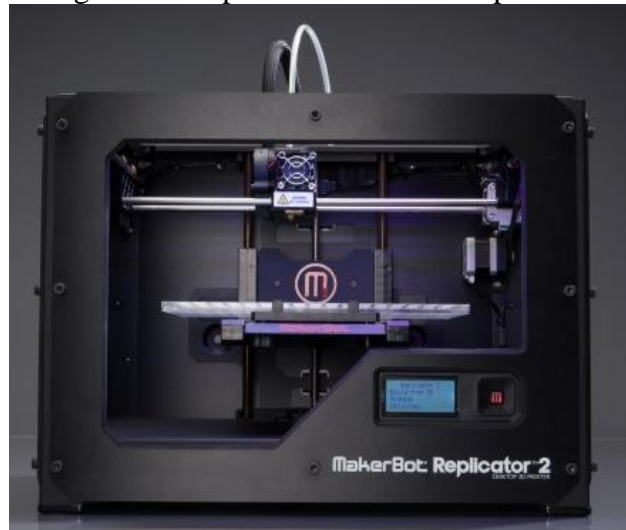
El PLA es de origen vegetal, es biodegradable y al extruirse no emite vapores tóxicos el ABS es hecho a base de químicos y hay que tener buena ventilación para evitar que sus vapores causen daño.

Después de un análisis de todos los parámetros expuestos se llegó a la conclusión que el material que se adapta a nuestras necesidades de construcción es el PLA, este material cumple con todas las características y propiedades.

4.3.1 *Impresión de las piezas.* Utilizamos la técnica FDM (modelado por deposición fundida) para construir las piezas de nuestro brazo robótico. Para la construcción de todas las partes que conforman el brazo robótico se ha empleado una impresora 3D. Esta impresora es la Makerbot Replacator, en la tabla 18 se muestran las especificaciones técnicas de la impresora.

Todos los archivos deben estar en un formato STL (es el formato estándar para las tecnologías de fabricación aditiva, utiliza una malla de triángulos cerrada para definir la forma de un objeto), para construir las piezas.

Figura 51. Impresora Makerbot Replacator



Fuente: <http://goo.gl/6GhgUp>

Tabla 17. Especificaciones técnicas de la impresora

Impresión	Especificaciones
Tecnología de impresión:	Fabricación con Filamento Fundido
Volumen de impresión:	9,7" de ancho x 6,4" de largo x 6,1" de alto [24,6 cm x 16,3 cm x 15,5 cm]
Diámetro del filamento:	1,75 mm (0,069 in)
Diámetro de la boquilla:	0,4 mm (0,015 in)
Software	
Paquete de software:	MakerBot MakerWare™
Archivos admitidos:	STL, OBJ, Thing SO
compatibles:	Windows [7+], Ubuntu [11.10+], Mac OS X [10.6+]

Fuente: <https://goo.gl/KnhM5w>

4.3.1.1 *Parámetros de impresión.* Para iniciar un trabajo de impresión se deben ajustar los parámetros, estos parámetros influirán directamente en la resistencia, tiempo y calidad del objeto.

Entre los parámetros principales tenemos:

- **Peso:** el peso de cada elemento está especificado en gramos.

- **Tiempo:** el tiempo varía según el tamaño y la complejidad del modelo.
- **Infill:** este valor indica el relleno que va a tener la pieza, el relleno va a estar estrechamente ligado al tiempo de impresión y por ende al costo, este parámetro va a determinar la resistencia de la pieza, se recomienda un relleno de 20% para piezas que no sean sometidas a ningún esfuerzo, mientras que para piezas que deban soportar pesos y esfuerzos se recomienda un relleno de 80%.
- **Resolution:** es el valor de la altura de las capas, está relacionado a la calidad de la pieza, mientras más delgada sea la capa, mas capas por milímetro tendrá el objeto impreso, y la textura será más suave.
- **Shells:** este es el grosor de las paredes, Si este valor es muy alto (paredes muy gruesas) la pieza será poco flexible (estas paredes sí serán macizas) y si, por el contrario, son muy delgadas, las paredes podrían romperse y comprometer la integridad de la pieza.
- **Raft:** son bases planas que se imprimen antes del objeto para garantizar la estabilidad del objeto en la base de la impresora.
- **Support:** son soportes que proporcionan una base para las piezas voladizas de un modelo.

En la tabla 19 se muestran los parámetros de las impresiones clasificados por subconjuntos, los parámetros cambian debido a los esfuerzos y al peso que deben soportar las distintas piezas, como se analizó en este capítulo.

Tabla 18. Parámetros de impresión de la muñeca

Descripción	Peso [gr]	Tiempo[h]	Infill	Resolución	Shells	Raft	Support
Rotación de la muñeca 1	10	0:39	30	0,2	3		
Rotación de la muñeca 2	24	1:38	30	0,2	3		
Rotación de la muñeca 3	47	3:24	30	0,2	3		
Engranajes de la muñeca	13	1:44	80	0,1	6		
Soporte de cable	4	0:17	30	0,2	3		
Total	98	6:62					

Fuente: Autores.

Tabla 19. Parámetros de impresión de la mano

Descripción	Peso [gr]	Tiempo [h]	Infill	Resolución	Shells	Raft	Support
Dedo Meñique	8	0:52	60	0,15	2		
Dedo Pulgar	21	2:07	60	0,15	2		
Dedo Índice	11	1:13	60	0,15	2		
Dedo Medio	14	1:25	60	0,15	2		
Dedo Anular	10	1:06	60	0,15	2		
Base muñeca larga	57	5:00	30	0,15	3		
Base muñeca pequeña	24	2:04	30	0,15	3		
Cubierta de dedo	11	0:43	30	0,20	2		x
Superficie superior de la mano	33	2:07	30	0,20	2		
Tornillo espaciador	16	1:43	80	0,15	3		
Soporte de Arduino	9	0:38	30	0,20	2		
Total	214	17:38					

Fuente: Autores.

Tabla 20. Parámetros de impresión del antebrazo

Descripción	Peso [gr]	Tiempo [h]	Infill	Resolución	Shells	Raft	Support
Tapa superior de brazo 3	56	4:00	30	0,2	3	x	
tapa superior de brazo 4	88	6:00	30	0,2	3	x	
tapa superior de brazo 2	75	6:53	30	0,15	3	x	
tapa superior de brazo 5	102,01	7:00	30	0,2	3	x	
Placa antebrazo	28	1:39	70	0,2	3		
Polea del servo	16	1:07	70	0,15	3		
Guía para cables posteriores	6	0:23	30	0,2	2		
Cama servomotores	54	2:59	30	0,2	3		
Guía para cables frontales	11	0:45	30	0,2	2		
Placa inferior hombro	66	2:50	30	0,3	3		
Placa lateral hombro	29	1:14	30	0,3	3		
Base de giro hombro	45	2:46	60	0,2	3		
Placa superior hombro	22	0:51	100	0,3	3		
Engranaje hombro	3	0:08	30	0,3	3		
Tornillo sin fin hombro	44	1:49	30	0,3	3		
Total	645.01	37:44					

Fuente: los autores.

Tabla 21. Parámetros de impresión del bíceps

Descripción	Peso [gr]	Tiempo [h]	Infill	Resolución	Shells	Raft	Support
Tuerca de potencia	34	1:19	100	0,3	0,3		
Tornillo de potencia	49	1:55	100	0,3	0,3		
Soporte servo	31	1:26	30	0,3	3		
Base servo v1	24	1:02	30	0,3	3		
Placa servo	7	0:18	30	0,3	3		
Reforzador	12	0:30	30	0,3	3		
Parte alta del brazo	35	2:54	30	0,3	3		
Parte baja del brazo	28	2:22	30	0,3	3		
Engranaje del eje del codo	22	1:19	60	0,2	3		
Engranaje de potenciómetro	3	0:08	60	0,2	3		
Tapa superior de brazo 1	53	2:45	30	0,3	2		
Tapa superior de brazo 2	37	1:54	30	0,3	2		
Tapa superior de brazo 3	81	4:07	30	0,3	2		
Soporte de engranaje	4	0:20	60	0,2	3		
Total	420	19:79					

Fuente: Autores.

Tabla 22. Parámetros de impresión del hombro

Descripción	Peso [gr]	Tiempo [h]	Infill	Resolución	Shells	Raft	Support
Placa lateral hombro tórax 1	21	1:02	30	0,3	3		
Tapa placa hombro tórax	50	2:04	30	0,3	3		
Placa hombro tórax	50	2:04	30	0,3	3		
Total	121	5:01					

Fuente: Autores.

El tiempo total de construcción del bazo robótico es de 86 horas con 24 minutos, divididos en jornadas de 8 horas diarias de trabajo dando un total de 11 días laborables. El software calcula automáticamente el tiempo de impresión según la forma y los parámetros.

El peso total del brazo es de 1498.01 gramos.

CAPÍTULO V

5. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HARDWARE DEL SISTEMA

En este capítulo se describe los elementos necesarios para poner en funcionamiento el brazo robótico.

Los pasos necesarios para esta etapa son: Selección de componentes, diseño y construcción del guante sensorizado, ensamble de piezas impresas y montaje de servomotores en la estructura, cabe recalcar que en el siguiente capítulo se detallara el software y la programación con más detalle.

5.1 Selección de componentes electrónicos

Cada elemento debe adaptarse a nuestra necesidad, los componentes deben presentar buenas características para conseguir el óptimo funcionamiento del brazo inalámbrico.

Selección de componentes electrónicos

Para una correcta selección se utilizara un método de calificación que determinara la mejor opción entre las alternativas de componentes electrónicos.

Este método constara en calificar los parámetros con la ayuda de la siguiente tabla.

Tabla 23. Ponderación

Interpretación	Porcentaje [%]	Calificación
Insuficiente	0-49	1
Suficiente	50-59	2
Satisfactorio	60-69	3
Bueno	7-79	4
Excelente	80-100	5

Fuente: Autores.

La alternativa que obtenga una mayor calificación será la mejor opción y por lo tanto será el componente que se utilizara en el brazo inalámbrico.

5.2 Tipos de motores que se pueden utilizar en el brazo robótico

Un tipo de motor que pueden ser utilizados en el brazo robótico son los servomotores, presentan buen torque esto es esencial para ejecutar un buen movimiento, su programación y control no es compleja, otra razón para escoger estos tipos de motores es que son de corriente continua, también se considera el movimiento de giro estos elementos pueden girar en dos sentidos, para la movilidad de la muñeca es muy importante contar con esta característica.

5.2.1 *Selección de servomotores.* Los servomotores son la parte principal en la estructura del brazo inalámbrico, son los que logran la movilidad, es por esto que se deben seleccionar los servomotores adecuados que permitan mover la estructura según su peso y fuerza, se consideraran algunos criterios en la selección de estos elementos.

La estructura está diseñada con 7 servomotores, 5 servomotores para el movimiento de los dedos, 1 para el giro de la muñeca, y 1 para el movimiento del antebrazo y el giro del hombro.

Cada servomotor se controlara independientemente, cada uno de estos puede tener posiciones diferentes según como se vaya realizando los movimientos de los dedos de la mano.

5.2.2 *Selección de servomotores para el movimiento de los dedos.* Este servomotor será utilizado para el movimiento de los 5 dedos del brazo robótico, se deben considerar criterios técnicos básicos para la selección de este servomotor.

El servomotor debe presentar buena velocidad y buen torque, los pesos de los dedos tienen un peso mínimo 8 y máximo 21 gramos, a este peso se debe añadir el objeto que se va a manipular.

Para seleccionar el servomotor adecuado se deben analizar varios factores como: velocidad de reacción, grados de movimiento, y fuerza ejercida.

En el mercado existen varios tipos de servomotores que difieren en tamaño torque y velocidad.

Se tienen varias alternativas de fabricantes y modelos de servomotores:

- Hitec HS-485BB
- Airtronics 94772M
- E-sky EK2-0501
- JR JR 3321

Tabla 24. Selección de la mejor alternativa

Alternativas		Parámetros de selección				Calificación
Fabricante	Modelo	Tamaño	Torque	Velocidad de respuesta	Costo	
Hitec	HS-485BB	4	5	5	4	18
Airtronics	94772M	3	4	4	3	14
E-sky	EK2-0501	3	5	4	4	16
JR	JR 3321	4	3	4	4	15

Fuente: Autores.

Se concluye que la mejor opción es la alternativa A, tendrá una fuente de energía de 6v, el servomotor será de corriente continua para la precisión de los movimientos. El giro será en ambos sentidos para los movimientos de flexión y extensión de los dedos según como se realice los moviminetos.

Se pueden encontrar fácilmente en el mercado a un precio módico.

Presentan facilidades para su montaje, están diseñados con agujeros para el montaje en la estructura del brazo robótico.

Se seleccionaran 5 de estos servomotores y se montaran en la parte interior del antebrazo, se harán una pequeña modificación en el final del eje, se desmontara el actuador y se colocara una rueda tipo polea para colocar el cable de pescar que simulara los tendones.

A continuación se detallan características del servomotor seleccionado.

5.2.2.1 Servomotor HITEC HS-485BB. Son muy utilizados en robótica, de alto torque, son muy resistentes a impactos por el material de sus piñones que son tres veces más resistentes que los de nylon, es un servomotor de fácil acceso en el mercado, su eje cuenta con un excelente centrado.

Figura 52. Servomotor Hitec HS-485BB



Fuente: <https://code.google.com/p/lnu>

Las características del servomotor se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 25. Características Servomotor HS-485BB

Características Servomotor HS-485BB	
Voltaje de operación	4.8-6.0 V.
Velocidad de operación	0.22sec/60° (4.8V), 0.18sec/60°(6.0V)
Torque detenido	4.8 kg.cm (4.8-6.0 V).
Ángulo de rotación	180°
Peso	45.08 Gramos
Dimensiones	39.88 x 19.81 x 37.85 mm
Largo del cable	300 mm
Engranajes	de karbonita
Temperatura de trabajo	20 a 60°C

Fuente: Autores

5.2.3 Selección del servomotor para el movimiento rotacional de la muñeca

Se tiene varias alternativas para que varían en sus características:

- Hitec HS-485BB
- Airtronics 94772M
- E-sky EK2-0501
- JR JR 3321

Este servomotor será el encargado del movimiento de rotación de la muñeca, se debe considerar el peso que es diferente al de los dedos, esta estructura es más pesada por el ensamble de la mano.

Tabla 26. Selección de la mejor alternativa

Alternativas		Parámetros de selección				Calificación
Fabricante	Modelo	Tamaño	Torque	Velocidad de respuesta	Costo	
Hitec	MG996	4	5	4	4	17
Airtronics	94647	3	4	4	3	14
E-sky	EK2-0501	3	4	4	4	15
JR	JR 2721	4	3	4	4	15

Fuente: Autores

Con la suma del puntaje se concluye que la mejor opción es A, servomotor Hitec MG996, el servomotor posee un torque adecuado. Del movimiento rotacional de la mano va a depender la precisión en la manipulación de elementos, tendrá un movimiento continuo este servomotor presenta buenas características de resistencia, los engranajes están fabricados en metal.

Tendrá una fuente de energía de 6v, el servomotor tiene un voltaje de operación de 4.8v a 7v, se encuentra en el rango y además tiene una tolerancia de 1v lo que es mejor.

El giro del servomotor es de 180

Este servomotor tiene buena precisión esto es importante además de la velocidad de movimiento y la velocidad de freno.

El tamaño es otro criterio por el cual se escogió este servomotor, el servomotor va a estar montado en el interior de la muñeca, el espacio aproximado para el acople es de 50mm el servomotor tiene un tamaño de Largo 40.7 mm, ancho 19.7 mm, altura 42.9 mm aproximado, es ideal para este trabajo.

La estructura debe ser lo más liviana posible el peso del servomotor es de 5 gramos es un servomotor liviano para su uso.

Como se puede describir en los requerimientos técnicos este servomotor es el adecuado para el movimiento de esta estructura, a continuación se describe este servomotor.

5.2.3.1 *Servomotor MG996.* Cuenta con engranajes de metal. Este servo estándar de alta torsión puede girar aproximadamente 120 grados (60 en cada dirección).

Se puede utilizar cualquier servo código, hardware o biblioteca para controlar estos servos, así que es útil para principiantes que quieren hacer que las cosas se muevan sin la construcción de un controlador de motor con retroalimentación y caja de cambios, sobre todo porque se encajará en lugares pequeños.

Para uso continuo se recomienda un peso de 12 kg máximo.

Figura 53. Servomotor MG996



Fuente: <http://www.pccomponentes.com>

En el siguiente cuadro se aprecian las características técnicas de este servomotor.

Tabla 27. Características Servomotores MG996

Características Servomotores MG996	
Voltaje de operación	4.8 V a 7.2 V
Velocidad de operación	0.17 s/60° (4.8 V), 0.13 s/60° (6 V)
Torque detenido	9 kgf·cm (4.8 V), 11 kgf·cm (6 V)
Ángulo de rotación	120° aprox
Peso	55 g
Dimensiones	Largo 40.7 mm, ancho 19.7 mm, altura 42.9 mm aprox.
Largo del cable	31 cm aprox
Engranajes	Metálicos
Temperatura de trabajo	0 °C a 55 °C

Fuente: Autores

5.2.4 Selección del servomotor para el movimiento del brazo

En el mercado se tiene varias opciones con características similares:

- Hitec HS-485BB
- Airtronics 94772M

- E-sky EK2-0501
- JR JR 3321

Selección de la mejor alternativa

Tabla 28. Selección de la mejor alternativa

Alternativas		Parámetros de selección				Calificación
Fabricante	Modelo	Tamaño	Torque	Velocidad de respuesta	Costo	
Hitec	HS-805BB	4	5	5	5	19
Airtronics	94673	4	4	4	4	16
E-sky	EK2-0506	3	5	4	4	16
JR	JR 4721	4	3	4	4	15

Fuente: Autores

Para la selección del servomotor se tomó en consideración el peso y el torque que debía ejercer, este servomotor será el encargado de mover toda la estructura del brazo es el servomotor que se colocara al final de la estructura y por lo tanto soportara y moverá más peso que los servomotores anteriores. Se concluye que la opción A es la mejor opción.

Nuestra selección además se basó en el dato de características del servomotor y según esta información es especialmente usada para brazos robóticos y sistemas que requieran un alto torque, es decir que este servomotor fue el indicado para mover toda la estructura del brazo robótico.

Su voltaje de operación está dentro del rango de nuestra fuente de alimentación.

Los engranajes son hechos de un nylon altamente resistente, esta característica es buena debido a la carga constante que estará sometido es sistema de engranajes por el continuo movimiento. Todos los servomotores son de la marca hitech por ser una marca muy comercializada en el mercado, las características der servo se mencionan a continuación:

5.2.4.1 Servomotores Hitec HS-805MG. Es uno de los servomotores más potentes, recibe 6v y entrega un impresionante torque de casi 24kg/cm, por su alto rendimiento es utilizado en brazos robóticos y sistemas electromecánicos que requieren posicionamiento, está dentro de una carcasa robusta capaz de soportar polvo y agua (no sumergible).

Figura 54. Servomotor HS-805BB



Fuente: <http://www.nghobbies.com>

Tabla 29. Características del servomotor HS-805BB

Características del servomotor HS-805BB	
Voltaje de operación	4.8-6.0 V
Velocidad de operación	0.19/0.14 sec/60° (4.8/6.0V)
Torque detenido	19.73/24.7 kg-cm (4.8/6.0V)
Ángulo de rotación	180°
Peso	152g
Dimensiones	66 x 30 x 57.6mm
Largo del cable	300mm
Engranajes	Nylon de Alto Rendimiento
Temperatura de trabajo	0°C a 70°C

Fuente: Autores

Por sus buenas características los tres servomotores Hitec HS-485BB, MG996 y HS-805BB fueron seleccionados para cumplir con las funciones de movimiento de cada una de las partes del brazo inalámbrico.

5.2.5 Selección del Arduino. En el mercado existen varias placas Arduino con diferentes características. La selección del Arduino es importante se deben considerar las entradas analógicas y digitales que posee, además de la fuente de alimentación, en este proyecto se utilizó una fuente de energía de 6v.

Estas placas son usadas según las características de los componentes que se utilizaran, para una correcta selección se tomó en cuenta varios parámetros y se realizó una matriz de selección para estimar la mejor propuesta. Se tomó contacto con algunas empresas que comercializaban artículos electrónicos, las mejores propuestas son de 4 empresas proveedoras que comercializaban distintos tipos de Arduino:

Alternativas

- Arduino Leonardo R3
- Uno R3
- Mega R3
- ProMini 05

Tabla 30. Selección de la mejor alternativa

Alternativas		Parámetros de selección				Calificación
Modelo	Proveedor	Tamaño	Velocidad	Procesador	Costo	
Arduino Leonardo R3	Importronic	4	4	5	4	17
Uno R3	Electrónica JNC	2	4	2	5	13
Mega R3	Importronic	3	3	3	3	12
ProMini 05	Impomax	1	2	3	3	9

Fuente: Autores

Los parámetros para la calificación de la mejor alternativa son 5, proveedor, costo y tamaño velocidad y procesador, el valor mayor según nuestra calificación es la alternativa A (Arduino Leonardo R3).

Se seleccionó el Arduino Leonardo R3 por sus características, además de su costo. Otro parámetro a ser tomado en cuenta para la selección fue la programación, el Arduino Leonardo R3 es compatible con el Arduino IDE (Integrated Development Environment), el cual es un software gratuito que simplifica en gran medida la tarea de programar el microcontrolador. Una ventaja del Arduino R3 es que está basada en un procesador más potente que nos brinda mayor velocidad además de tener comunicación USB integrada. A continuación se detalla particulares del Arduino seleccionado.

5.2.5.1 Arduino Leonardo R3. Arduino Leonardo R3 es la primera placa de desarrollo de Arduino que utiliza un microcontrolador ATmega32U4 el cual tiene incorporado el puerto USB eliminando la necesidad de otro chip para la comunicación con la PC lo que permite que la placa sea más barata y más simple.

Otra de sus ventajas es que hay bibliotecas de código para el puerto USB que permiten que la placa pueda emular un teclado de computadora, un ratón, y más.

Arduino Leonardo R3 cuenta con 20 entradas / salidas digitales (de los cuales 7 se pueden utilizar como salidas PWM y 12 entradas como analógicas), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión micro USB, un conector de alimentación, un header ICSP, y un botón de reset. Se puede alimentar conectándolo a un ordenador con un cable USB, o con un eliminador o una batería.

Al ser una plataforma abierta las placas pueden fabricarse en todo el mundo, por lo que cabe aclarar que es idéntica en todos sus componentes que la fabricada en Italia, pero su construcción es en China aunque es compatible 100% con el software y hardware Arduino

Figura 55. Arduino Leonardo R3



Fuente: <http://www.electronicoscaldas.com>

Tabla 31. Características Arduino Leonardo R3

Características Arduino Leonardo R3	
Microcontroladores	ATmega32u4
Tensión de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límites)	6-20V
Digital pins I / O	20
Canales PWM	7
Canales de entrada analógicos	12
Corriente DC por E / S Pin	40 mA
Corriente DC de 3.3V Pin	50 mA
Memoria flash	32 KB (ATmega32u4) de los cuales 4 KB utilizado por el gestor de arranque
SRAM	2,5 KB (ATmega32u4)
Velocidad de reloj	16 MHz
Largo	68,6 mm
Ancho	53,3 mm
Peso	20g

Fuente: Autores

5.2.6 Selección Bluetooth. Para poder mover los dedos y la muñeca en nuestro brazo robótico se requiere tener una conexión inalámbrica para mayor facilidad de utilización en este caso se ha seleccionado una conexión vía bluetooth para esto es necesario seleccionar un módulo bluetooth adecuado.

5.2.6.1 Justificación del Bluetooth seleccionado. El módulo Bluetooth Hc-05 es el que ofrece una mejor relación de precio y características en el mercado, es un módulo maestro esclavo, es decir que además de recibir conexiones desde un ordenador o Tablet también envía señales mediante bluetooth.

La entrada de voltaje es de 3.3 v, el Arduino posee los reguladores que entregan 3.3v y 5 v, no se debe exceder de este voltaje.

Otro parámetro para seleccionar este módulo es que en este proyecto se utiliza un arduino Leonardo R3 que posee una conexión micro USB, esto servirá para comunicarse con el modulo y configurarlo.

Figura 56. Modulo Bluetooth Hc-05



Fuente: <http://www.geekfactory.mx>

Tabla 32. Características del módulo bluetooth Hc-05

Características del módulo bluetooth Hc-05	
Bluetooth	versión V2.0+EDR
Tensión de alimentación	3.3V
Frecuencia	2.4GHz banda ISM
Modulación	GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying)
GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying)	2.1Mbps (Max) / 160 kbps ; Síncrono: 1Mbps/1Mbps
Temperatura de trabajo	-20 °C a +75 °C
Dimensiones	26.9mm x 13mm x 2.2 mm
Configuración por defecto para el puerto COM	9600, N, 8,1

Fuente: Autores

5.3 Diseño y construcción del guante sensorizado

5.3.1 *Arquitectura del sistema.* El guante sensorizado es un elemento provisto con sensores de flexión y un Giróscopo de 4 ejes, se utilizó un sensor Flex 2.2 por cada dedo, envía datos hacia el Arduino al momento de flexionarse.

Los 5 sensores están montados estratégicamente en un guante diestro flexible, para sensar el movimiento de la muñeca se utilizó un Giróscopo de 4 ejes para maximizar la sensibilidad. Una vez digitalizados los datos de posición estos son procesados, almacenados y actualizados continuamente y se entabla la comunicación vía bluetooth entre Arduino y Arduino.

5.3.2 *Elementos del guante sensorizado.* El guante sensorizado está compuesto por varios elementos descritos a continuación.

5.3.2.1 *Guante.* Para el desarrollo del guante sensorizado se escogió un guante diestro, se tomó en cuenta la flexibilidad de este elemento, el guante seleccionado está confeccionado de algodón y poliéster, brinda comodidad y calor para ser usados en lugares refrigerados

El guante seleccionado se lo puede observar en la figura.

Figura 57. Guante de algodón.



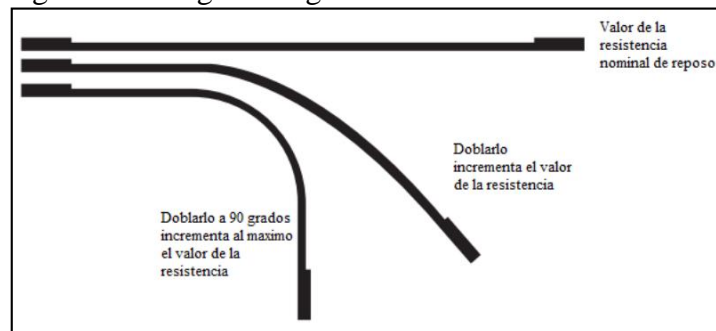
Fuente: Autores

5.3.2.2 *Sensor flex 2.2".* Es una resistencia eléctrica variable construida sobre una cinta plástica alargada y flexible de 2.2" de largo (5.58 cm), su funcionamiento es bastante sencillo consiste en una resistencia que varía su valor dependiendo de la curva que experimenta el sensor. Su variación en curvatura es transformada a resistencia eléctrica,

a mayor curvatura mayor resistencia, este valor puede ser fácilmente interpretado a través de una entrada análoga.

Cuando el sensor se encuentra completamente recto tiene una resistencia nominal de 10 kΩ. En 90° la resistencia de los sensores aumenta aproximadamente a 35 kΩ. Esta variación se la puede evidenciar en la figura.

Figura 58. Rango de ángulos de reacción del Flex sensor



Fuente: <http://file.scirp.org/Html>

A continuación se muestran las características de este sensor.

Tabla 33. Características sensor flex

Características sensor flex	
Rango de resistencia	1,5-40kΩ dependiendo del sensor
tiempo de vida	Más de 1 millón de usos
rango de temperatura	35°C hasta 80°C
Histéresis	7%
Voltaje	5 a 12 v

Fuente: Autores

- Justificación del sensor utilizado

Después de una revisión bibliográfica en sistemas de guantes sensorizado y considerando algunos parámetros de selección se optó por utilizar un sensor Flex, los parámetros tomados en cuenta son:

- Uso: según su hoja de datos esos sensores son utilizados específicamente en guantes para detectar movimiento del dedo, para controlar automóviles, instrumentos musicales, juguetes etc.

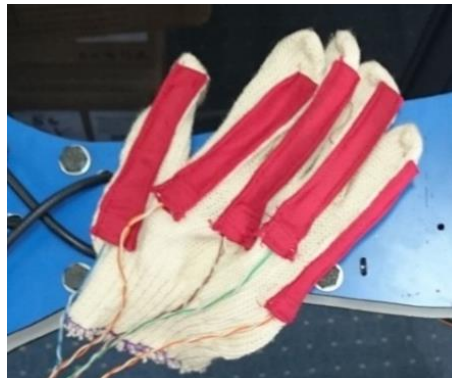
- Medio: se debe considerar un sensor con una longitud considerable que se adapte perfectamente a un guante y mida la flexión de los dedos.
- Características eléctricas: que trabaje en un rango de polarización de 5v DC a 12v DC, debido a nuestra fuente de energía.
- Flexibilidad: estos sensores son muy flexibles este parámetro es esencial para poder controlar mediante el guante sensorial el movimiento de la mano
- Costo: son sensores con precios bastante accesibles, se los puede encontrar con facilidad en el mercado

Las características técnicas y físicas se ajustan a el requerimiento, es por esto que se seleccionó este sensor para continuar con el desarrollo del proyecto, se colocaran cinco sensores uno en cada dedo del guante seleccionado.

5.3.3 Construcción del guante sensorizado. Con los componentes mencionados anteriormente se procede a la construcción del guante sensorizado, es fundamental colocar de forma adecuada cada sensor para que cumpla correctamente con su función al momento de la flexión de cada dedo.

La ubicación de los sensores fue realizada mediante marcas en el guante insertado en la mano, ya con las marcas identificadas se confecciona un espacio con tela roja tipo bolsillo para la inserción de los sensores, para fijarlos y resguardarlos la tela roja se coció al guante.

Figura 59. Sensores flex colocados en el guante



Fuente: Autores

Los Sensor flex 2.2 son unidos a unos cables de conexión mediante una soldadura blanca y asegurados con un revestimiento termoretráctil como se muestra en la figura.

Figura 60. Cables de salida sensores flex



Fuente: Autores

5.3.3.1 *Fuente de alimentación del guante sensorizado.* Se alimenta por una batería de 6 v la cual el Arduino regula el voltaje a 5 v de trabajo porque los componentes trabajan a dicho voltaje.

El guante sensorizado funcionara mediante modulación por anchos de pulso o PWM (Pulse Width Modulation), esta es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, ya sea para transmitir comunicación o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

Como en nuestro proyecto se utilizan servomotores la modulación por ancho de pulso modifica la posición del servomotor de acuerdo al ancho de pulso enviado.

5.3.3.2 *Diseño del circuito acondicionador para el flex sensor.* Al momento de utilizar servomotores se requiere de un circuito, el cual nos arroje un tren de pulsos con determinadas características

Se requieren 5 circuitos para cada dedo

5.3.4 *Selección Giróscopo 4 ejes.* El giróscopo de 4 ejes nos proporciona la velocidad angular del eje x e y, se utilizara para medir la rotación de la posición del equilibrio del operador y enviara una señal

Correcciones al servomotor ubicado estratégicamente en el brazo para producir el movimiento de rotación de la mano.

Los giróscopos se utilizan en objetos que no estén girando muy rápido, es perfecto para detectar el movimiento que realizara el operario, este será lento para lograr precisión en los objetos manipulados.

Se seleccionó este dispositivo por su alcance, el movimiento que realiza una persona en la muñeca es de rotación y este ángulo no es tan pronunciado, para esta aplicación el giróscopo tiene una buena velocidad angular.

Otro parámetro para seleccionar este giróscopo es el margen de error off-set, la precisión es fundamental en este proyecto, este giróscopo está integrado por un sensor de temperatura, con la ayuda de este dispositivo se verificara la temperatura adecuada y se realizarán correcciones y calibraciones al giróscopo.

5.4 Componentes mecánicos

Para el ensamble del brazo robótico es necesario contar con varios componentes mecánicos, estos componentes servirán para desarrollar el movimiento correcto de todos los componentes, los principales mecanismos son:

- Engranajes: se construyeron diferentes ruedas dentadas con distintas dimensiones, se colocan en las articulaciones del brazo para generar movimiento
- Tornillo de potencia: en el brazo cumplen la función de cambio de movimiento de los servomotores de un movimiento angular a un movimiento lineal.
- Cables: en comparación con un brazo humano los cables serían los tendones, los cables dan el movimiento a los dedos del brazo robótico, la tensión adecuada asegura el correcto agarre de los objetos.

5.5 Ensamble de los componentes

El acabado en algunas piezas no es siempre el óptimo, por esta razón es importante revisar y si se requiere adecuar las piezas impresas. Se tendrán que lijar las piezas que presenten irregularidades y taladrar los agujeros que no estén bien definidos. Una vez impresas todas las piezas, se realiza el ensamble de los componentes.

La función principal de este proceso es unir todas las piezas entre sí para formar un solo conjunto o subconjunto completo, que finalmente dará como resultado nuestro brazo inalámbrico.

El ensamble se realizara en un orden específico, buscando la manera más fácil para agilizar este proceso.

5.5.1 *Ensamble del Antebrazo.* Se comienza con el ensamble del antebrazo para posteriormente seguir con la mano, se realizó en este orden para que no se complique la unión de los dedos con el alambre de pescar y los servomotores.

Para el ensamble del antebrazo se utilizó pegamento, tornillos, pinzas, estilete, bisturí, tijeras, lima, destornilladores.

Se coloca pegamento en los filos de las cubiertas de antebrazo 5, y se pegan estas partes procurando que estén totalmente alineadas y juntas, para garantizar la correcta unión se utiliza una pinza tipo mordaza y se espera un tiempo prolongado para que las piezas queden totalmente pegadas, adicional a esto se coloca con una brocha pequeña pegamento solo en la parte interna de las juntas.

Figura 61. Unión del antebrazo



Fuente: Autores

Este mismo procedimiento se repite para unir las cubiertas del antebrazo 5 y 4, que son las partes que cubrirán y protegerán a los servomotores y otros elementos. Se deben agrandar los agujeros desde la parte externa de la cubierta del antebrazo 2 con una broca de 6 mm. Una vez que estén unidos y secos estos dos componentes se ensamblan a la cama de los servomotores con ayuda de pegamento, para tener una mejor fijación se utiliza tornillos.

La cama tiene varios agujeros para montar los 5 servomotores.

Figura 62. Base para montar los servomotores



Fuente: Autores

En esta cama se colocan 5 servomotores que servirán para el movimiento de cada uno de los dedos de la mano robótica.

En este procedimiento se utilizó 5 Servomotores HITEC HS-485BB, se debe tener precaución para que los servomotores no se muevan, una ligera variación de posición puede afectar a la movilidad de los dedos, por esta razón cada servomotor está fijado en la cama con 4 tornillos como se aprecia

Figura 63. Servomotores ubicados.



Fuente: Autores

Se colocara las 5 piezas servo por donde pasara el cable de pescar, Se colocaran todos los servomotores a 90 grados con la ayuda de una programación del Arduino Leonardo R3, después estas piezas se montan en la parte superior de cada servomotor y se fijan con dos tornillos

Figura 64. Poleas



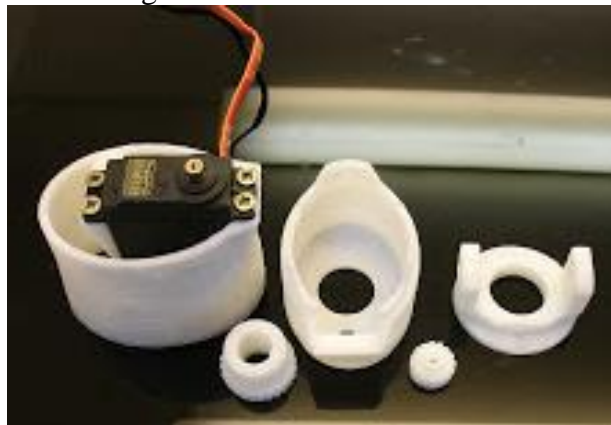
Fuente: Autores

Una vez que las poleas estén fijas se continúa con la secuencia de comandos, la posición de los servomotores es de 0° , esto servirá para colocar de manera correcta los cables de pesca, se debe mantener la posición a 0 grados si la posición varía nuevamente se los debe colocar a 0 grados.

5.5.2 *Ensamble de la muñeca de rotación.* En esta etapa se ensambla la muñeca, para esto es necesario pegamento, broca tornillos lima un servomotor MG996 que dará el movimiento de giro.

Para ensamblar la muñeca es necesario separar las piezas según el cuadro de especificaciones la imagen muestra las piezas necesarias para el ensamble de este subconjunto.

Figura 65. Piezas de la muñeca



Fuente: Autores

Para montar el servomotor MG996, se debe colocara en posición de 0° con ayuda de la programación de nuestro Arduino.

Se modifica la base que viene en el servomotor para colocar nuestro engranaje pequeño, se coloca dos tornillos para fijar la base a la rueda dentada pequeña.

Figura 66. Montaje del servomotor y rueda dentada



Fuente: Autores

La rueda dentada más grande se lubrica con grasa para mejorar su funcionamiento, se instala esta rueda dentada en la rotación del muñeca como se muestra en la figura, estas dos ruedas forman un sistema de engranajes que son los encargados de dar el movimiento de rotación a la muñeca y mano.

La grasa utilizada en la rueda dentada tiende a manchar esta pieza por esta razón se imprimió con un filamento de color negro.

Figura 67. Montaje del sistema de giro de la muñeca



Fuente: Autores

Se ensambla toda la muñeca con ayuda de pegamento, en la parte inferior donde se colocó el servomotor se montará el soporte de cable, en la parte superior de nuestro servomotor se colocará la guía para cable frontal, esta pieza ayudará a guiar los cables al orificio central

Figura 68. Montaje de la pieza guía de cables



Fuente: Autores

En esta imagen se puede apreciar todas las partes de la muñeca ensambladas, la posición de la imagen es la que se tiene con el servomotor a 180°

Figura 69. Ensamble total de la muñeca



Fuente: Autores

5.5.3 *Ensamble de la mano.* En el capítulo anterior se apreciaba todas las partes de nuestra mano, al ser piezas pequeñas se corre el riesgo de perderlas, el ensamble correcto de la mano será fundamental para lograr el objetivo de nuestra investigación, la mano hará el trabajo de manipulación de los objetos, tendrá un movimiento libre para mejorar el agarre y preservar los componentes.

En esta imagen se aprecia las partes principales de la mano, un dedo y las tres partes de las que está formada la palma.

Figura 70. Piezas principales de la mano



Fuente: Autores

Se inicia con el ensamble de los dedos, una vez ya impresos se debe tener cuidado para no confundir las partes de los dedos diferentes.

Además para que sea más rápido el ensamble se numera las partes del dedo para un montaje más fácil como se muestra en la figura.

Figura 71. Partes principales del dedo



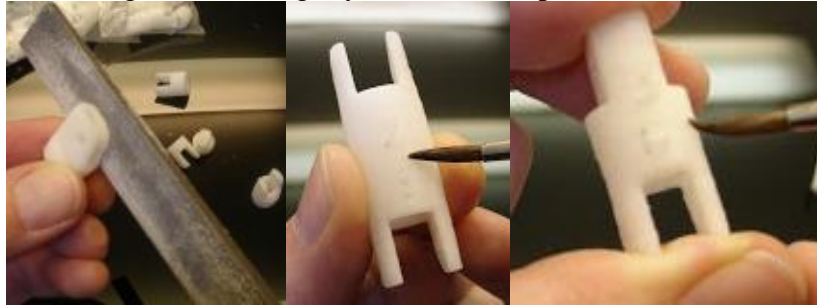
Fuente: Autores

Una vez definidas todas las piezas, los componentes del dedo tipo bisagra si es necesario se agrandan según nuestra necesidad

Además se hará una prueba de ensamble sin pegamento para verificar que todas las piezas se muevan sin dificultad, si no es este el caso las partes se limaran para un ensamble adecuado.

Se sigue con la unión de las dos piezas que formaran la falange falangina y falangeta de cada dedo.

Figura 72. Arreglo y unión de las piezas del dedo



Fuente: Autores

Una vez secas las piezas se obtienen las falanges de cada dedo. Estas piezas se montan con ayuda de un filamento que hará la función pasador en cada uno de los agujeros formando un sistema tipo bisagra, de la misma forma se ensamblan los 5 dedos.

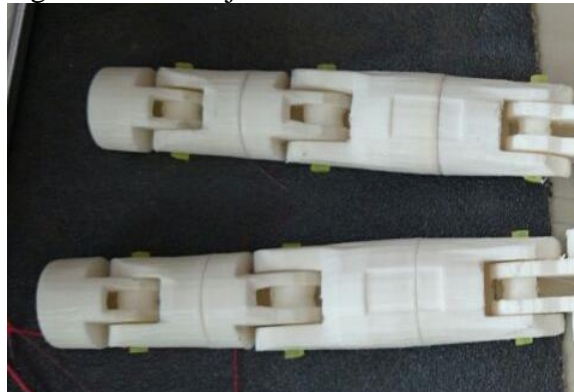
Figura 73. Ensamble de las articulaciones del dedo.



Fuente: Autores

En la imagen se aprecian dos dedos ensamblados, cada uno de los dedos se moverán libremente sin tener ningún roce entre las piezas.

Figura 74. Montaje total de las articulaciones

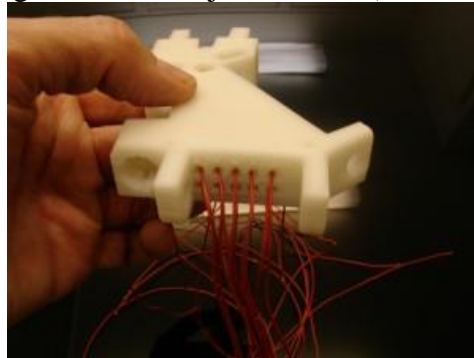


Fuente: Autores

El siguiente paso es cortar 10 pedazos de cable de nylon de pescar de 75 cm de largo, estos cables harán la función de los tendones en nuestra mano robótica.

Se observa que en la pieza más grande de la muñeca existen varios agujeros, estos cables traspasan los agujeros para conectarse posteriormente con los dedos. En la imagen se aprecia cables de colores, esta fue una prueba nuestro prototipo esta ensamblado con alambre de pesca de nylon transparente.

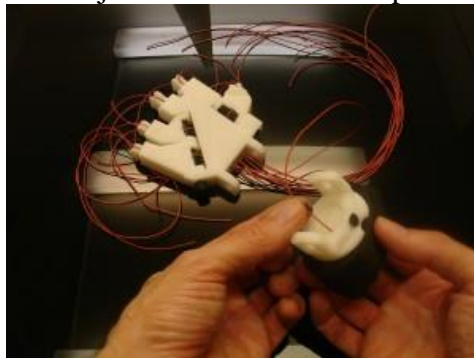
Figura 75. Montaje de cables (tendones)



Fuente: Autores

Las piezas restantes de la palma al igual que la pieza más grande tiene agujeros para introducir los cables, el siguiente paso es colocar los cables para los dedos pulgar anular y meñique. se debe tener cuidado para que los cables no se enreden entre sí. Al finalizar este montaje se debe tener una imagen similar a la mostrada a continuación.

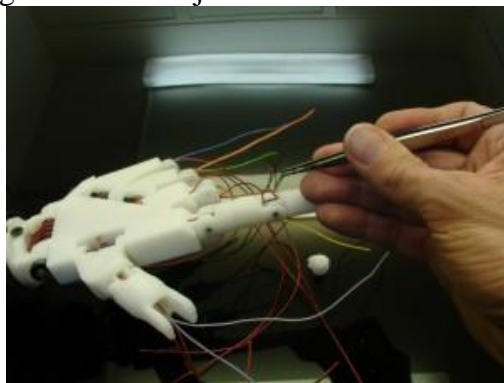
Figura 76. Montaje total de cables en la palma (tendones)



Fuente: Autores

En esta etapa se colocan los tendones en los 5 dedos, un alambre de pesca de nylon hará el papel de tendones, se debe tener paciencia y cuidado para introducir correctamente los cables, de esto dependerán el buen funcionamiento y agarre de la mano.

Figura 77. Montaje de tendones en los dedos



Fuente: Autores

Una vez introducidos todos los cables se realiza un nudo al final de cada dedo, se puede colocar una gota de pegamento para asegurar su firmeza. Concluido este paso se tiene completo el montaje de la mano, y cada dedo con sus respectivos cables.

Figura 78. Ensamble final de tendones en la mano



Fuente: Autores

Finalizada esta etapa se pegan las piezas restantes de los dedos, se coloca las cubiertas en los dedos y en la muñeca, para mejorar la estética de los dedos se construyeron 5 puntas de silicona para cada dedo.

Para esto se colocó silicona en la matriz de los dedos especialmente construida para este proceso luego de esperar unos minutos se obtienen las puntas que se colocaran al final de cada dedo, en la figura se aprecia la mano ensamblada en su totalidad y las puntas de los dedos de silicona de color negro.

Además para mejorar el agarre de la mano se colocaron pedazos de caucho en el interior de la palma.

Figura 79. Montaje de cubiertas de silicona en los extremos de los dedos



Fuente: Autores

Figura 80. Ensamble de cubiertas superiores en la mano



Fuente: Autores

El siguiente paso es montar los cables en la muñeca que al igual que la palma tiene agujeros que corresponde a cada uno de los dedos.

Figura 81. Montaje de cables (tendones) en la muñeca

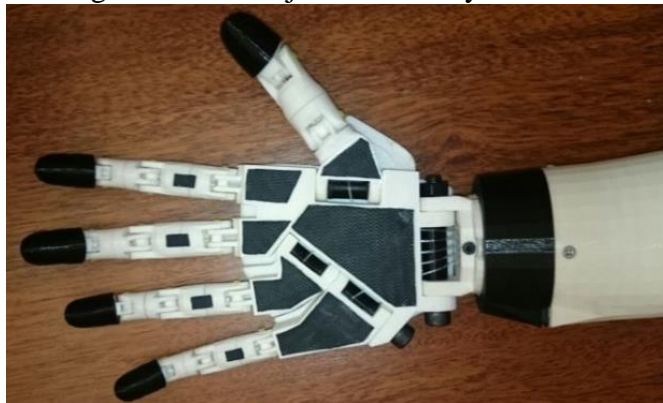


Fuente: Autores

5.5.4 *Ensamble de la muñeca con el antebrazo.* Para lograr un ensamble correcto se lima el filo para asegurar que la muñeca encaje correctamente con las cubiertas del antebrazo. Al montar la muñeca se debe asegurar que el servo este a 90 °.

La manera más fácil para montar correctamente la muñeca con el antebrazo es verificar que los dos tornillos este completamente alineados, se marcó una línea como se muestra en la figura. Esta imagen muestra el ensamble completo de la mano la muñeca y el antebrazo.

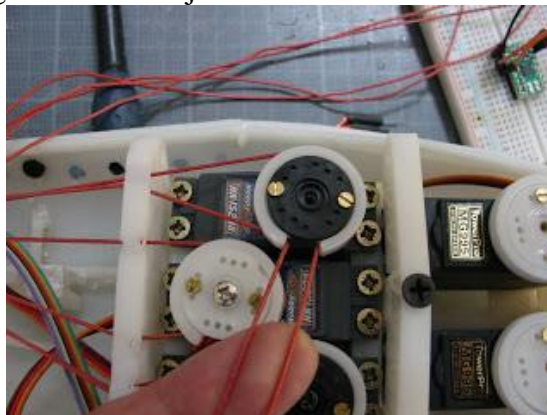
Figura 82. Montaje de muñeca y antebrazo



Fuente: Autores

5.5.5 *Montaje de los tendones.* La siguiente etapa es colocar correctamente los cables de pescar en las poleas de los servomotores. Se debe tomar en cuenta en todo momento no enredar los cables (tendones), todos los dedos deben estar extendidos en su totalidad, el cable se coloca desde la punta del dedo al servomotor, los cables deben pasar por los agujeros correspondientes y deben llegar a la polea del servomotor.

Figura 83. Montaje de cables en los servomotores

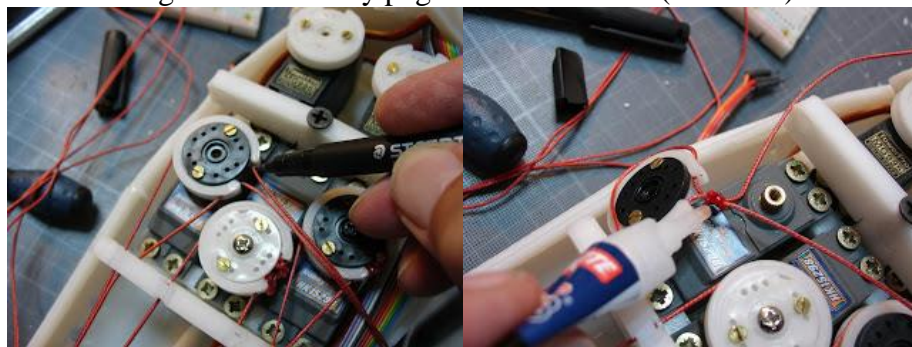


Fuente: Autores

Se coloca el cable alrededor de la polea, luego se procede a apretar con fuerza lo más que se pueda siempre verificando que el dedo se mantenga extendido. Cuando se tenga una tensión adecuada se hace una marca donde el cable sale de la polea,

Con la marca en los cables se desmonta la polea de nuestro servomotor, se hacen dos nudos en cada punta de la marca, de igual forma se hace otro nudo para juntar los dos cables, esto asegurara la tensión adecuada de los tendones, se coloca pegamento en cada nudo.

Figura 84. Marca y pegamento en cables (tendones)



Fuente: Autores

De nuevo se monta la polea en nuestro servomotor y se comprueba si el dedo se mueve con facilidad, si es así el tendón de nuestro dedo está montado correctamente si el dedo no se extiende o contrae se deberá tener mayor tensión para asegurar su correcto movimiento. El mismo proceso se hace con los 4 dedos restantes siempre verificando la tensión adecuada.

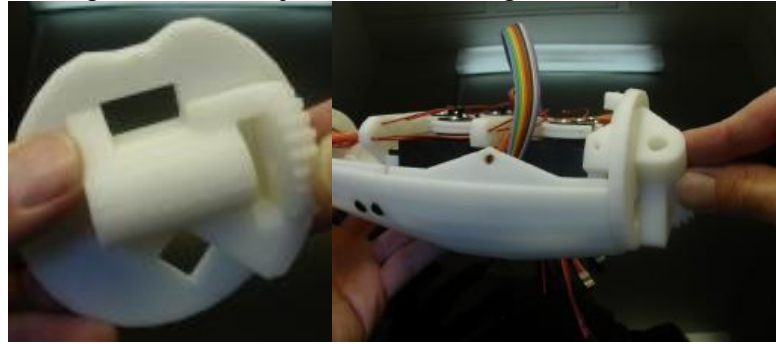
Figura 85. Montaje completo de cables (tendones)



Fuente: Autores

Para poder ensamblar el antebrazo se pega la base superior del antebrazo al engranaje del eje del codo, estas piezas se pegan al final del antebrazo.

Figura 86. Montaje del sistema de giro del antebrazo.



Fuente: Autores

Para terminar el ensamble de estos tres subconjuntos (mano, muñeca, antebrazo) se coloca las dos cubiertas que previamente deben ser pegadas.

La imagen muestra el antebrazo ensamblado en su totalidad, se puede destacar la estética de nuestro brazo inalámbrico.

Figura 87. Ensamble total del antebrazo.



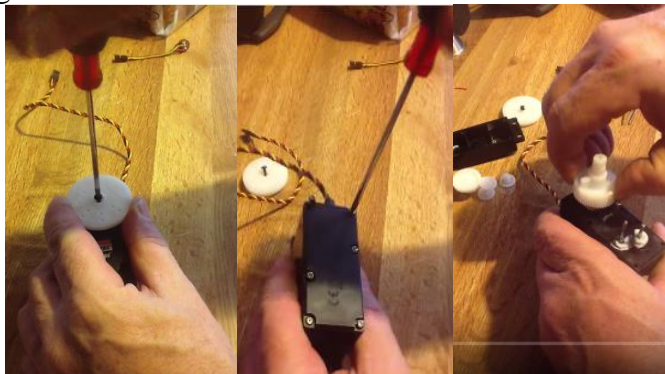
Fuente: Autores

5.5.6 *Ensamble del bíceps.* Se deben modificar los servomotores Hitec HS-805BB, se extraen los potenciómetros de los servomotores para agrandar la longitud de los cables de conexión.

Se trabaja en un lugar limpio y se tiene cuidado para no perder ningún componente, además para un montaje más rápido se tomara fotografías para evitar confusiones y reducir tiempos de fallas.

Se comienza desmontando el tornillo de la parte superior con ayuda de un destornillador, de la misma manera los tornillos de la parte inferior, se retiran las dos cubiertas (superior e inferior), se podrá apreciar los engranajes.

Figura 88. Modificación del servomotor Hitec HS-805BB



Fuente: Autores

Ahora es momento de desmontar la placa inferior y el motor, para esto se empuja desde la parte superior en algunos servomotores se encuentran pegados, primero se debe sacar ese pegamento para que salga con facilidad, se aprecia el potenciómetro conectado a tres cables de distinto color.

Figura 89. Desmontaje de placa del servomotor.



Fuente: Autores

El siguiente paso es retirar los puntos de soldadura de los cables con ayuda de un cautín, los cables que estaban en el interior del servomotor ahora saldrán para aumentar su longitud para esto es necesario agrandar el agujero de salida.

Figura 90. Limpiar soldadura

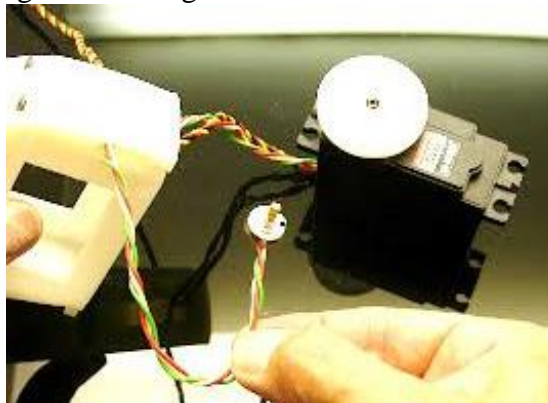


Fuente: Autores

Nuevamente se montan el sistema de engranaje según el orden y la fotografía tomada anteriormente, el orden de los colores se debe soldar en el mismo orden como cuando se abrió el servomotor.

La longitud de los cables deben ser aproximadamente de 25 a 30 cm antes de soldar el potenciómetro los cables deben ser introducidos en los agujeros de la cubierta del servo, en esta imagen se muestra el potenciómetro soldado con su longitud adicional. Este proceso se realizará con nuestros dos servomotores restantes.

Figura 91. Longitud adicional del servomotor



Fuente: Autores

El siguiente paso es colocar el sistema de tornillo sin fin en el hombro

Figura 92. Mecanismo de tornillo sin fin del hombro



Fuente: Autores

Una vez colocado el sistema de tornillo sin fin en el hombro se montara el sistema de movimiento del antebrazo (tornillo de potencia), se colocara este sistema en posición correcta para asegurar el correcto movimiento.

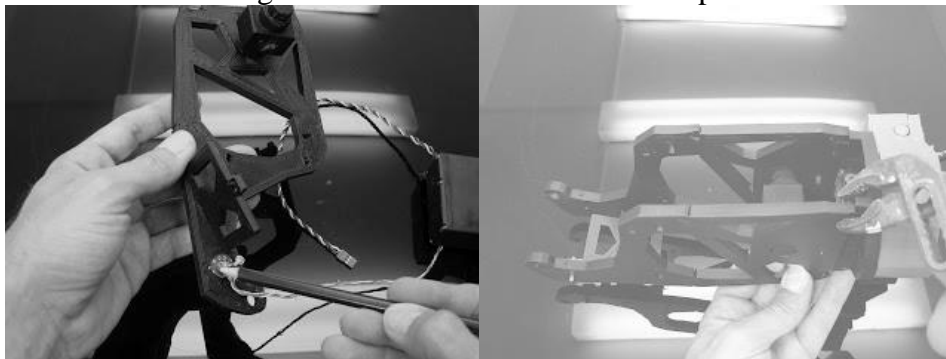
Figura 93. Tornillo de potencia



Fuente: Autores

Se colocara el espaciador entre la tuerca de potencia para separar las dos estructuras.

Figura 94. Estructura lateral del bíceps



Fuente: Autores

El siguiente paso es montar el servomotor HS-805 BB en la cubierta, los cables deben pasar por el agujero de esta pieza.

Figura 95. Cubierta del servomotor HS-805 BB



Fuente: Autores

El servomotor montado correctamente se ensambla con el subconjunto que se armó anteriormente para tener toda la estructura del bíceps, el siguiente paso es unir el antebrazo con el bíceps. En el soporte del servo se aprecian dos agujeros para unir los dos subconjuntos mediante un perno.

Al final del antebrazo se encuentra una rueda dentada que formara un sistema de engranajes con la rueda del bíceps, las ruedas deben sincronizarse correctamente.

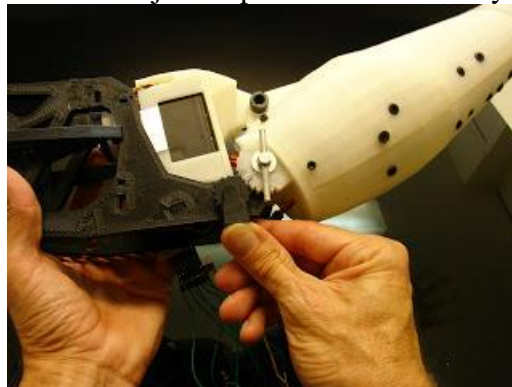
Figura 96. Montaje del sistema de movimiento del antebrazo



Fuente: Autores

Se deben hacer pruebas manuales entre los engranajes, con la ayuda del Arduino se colocara en la posición 0° , se debe girar manualmente el potenciómetro hasta que el servo gire, la posición de 0° se puede evidenciar cuando el antebrazo y bíceps están paralelos en una misma recta.

Figura 97. Montaje completo del antebrazo y bíceps



Fuente: Autores

5.5.7 *Ensamble del hombro.* Se deberán montar las dos placas laterales del hombro, la placa superior del hombro se colocara al final de la estructura.

La placa inferior del hombro se ensamblara mediante tornillos con la estructura del bíceps, en el interior se encuentra el sistema de tornillo sin fin.

Figura 98. Hombro ensamblado



Fuente: Autores

Finalmente una vez ensamblada toda la estructura del brazo inalámbrico este se acopla a un cilindro de nylon que está unido a una estructura de acero inoxidable que permitirá la estabilidad del prototipo al colocarse en una base firme.

El peso total del brazo inalámbrico con todos los componentes mecánicos y electrónicos es de 2440 gr

El alcance máximo de señal de recepción es de 20 m

CAPITULO VI

6. PROGRAMACIÓN, COMUNICACIÓN Y PRUEBAS

6.1 Lenguaje Arduino

La plataforma Arduino se programa mediante el uso de un lenguaje propio basado en el lenguaje de programación de alto nivel Processing que es similar a C++.

Processing es un lenguaje de programación y entorno de desarrollo integrado de código abierto basado en Java, de fácil utilización, y que sirve como medio para la enseñanza y producción de proyectos multimedia e interactivos de diseño digital. Fue iniciado por Ben Fry y Casey Reas a partir de reflexiones en el Aesthetics and Computation Group del MIT Media Lab dirigido por John Maeda. Se distribuye bajo la licencia GNU GPL.

6.1.1 *Estructura de programación de lenguaje Arduino.* Todo programa para Arduino presenta una estructura básica:

- 1ª parte `int x=0;` Declarar las variables.
- 2ª parte `void setup() {...}` Configuración de Arduino.
- 3ª parte `void loop() {...}` Comandos que regiran el comportamiento de Arduino.

1ª parte: Declarar las variables `int x=0`

Una variable es un valor que Arduino puede almacenar en su memoria, y que posteriormente podrá ser utilizado o modificado.

Los tipos de variables más utilizados son:

- `int`: almacena un número entero entre -32769 y 32767 (2 bytes).
- `float`: almacena un número decimal con un rango entre $-3.4028235 \cdot 1038$ y $3.4028235 \cdot 1038$ (4 bytes).

- `const`: especifica que la variable definida no podrá ser cambiada durante el programa, siendo un siempre un valor constante: `const float pi=3.1415`
- `2147483647` (4 bytes).
- `long`: almacena un número entero muy largo, entre -2147483648

Es importante saber que es posible declarar una variable sin asignarle un valor inicial, y hacerlo posteriormente durante el transcurso del programa:

```
int x; ... x=4;
```

Dominio de una variable: si declaro una variable al comienzo del programa, podré emplear dicha variable en cualquier momento (dentro de cualquier función o bloque de programa), pero si declaro una variable dentro de una función, solo se podrá utilizar en dicha función.

Poner nombre a las variables: Por último, una última consideración: a la hora de poner un nombre a una variable es recomendable utilizar alguna palabra que nos ayude a reconocer que se está almacenando en ella, y en caso de utilizar dos o más palabras se suele emplear la notación de joroba de camello (poner en mayúscula la primera letra de las siguientes palabras). Ejemplos son:

<code>ledPin</code>	<code>estadoAnterior</code>	<code>cuentaPulsaciones</code>
<code>miVariable</code>	<code>lecturaSensor</code>	<code>ledPinAzul</code>

2ª parte: Configuración de Arduino void `setup()` {...}

En este bloque habrá que especificar:

Que pines van a ser empleados como entrada y cuales como salida.

- `pinMode(2,OUTPUT);` //utilizare el pin 2 como salida Digital.
- `pinMode(3,OUTPUT);` //utilizare el pin 3 como salida Digital o Analogica.

– `pinMode(8,INPUT);` //utilizare el pin 10 como entrada Digital.

Las entradas analógicas no hacen falta incluirlas en el setup, puesto que esos pines (A0, A1, A2, A3, A4, A5) solo pueden ser entradas analógicas.

Si vamos a querer establecer una conexión con el ordenador.

`Serial.begin(9600);` hay que especificar los baudios (bits por segundo) a la que va a realizarse dicha comunicación Arduino-PC

Si vamos a querer utilizar número aleatorios.

`randomSeed(0);` //se inicia la generación de numero aleatorios.

3ª parte: Comandos que regirán el comportamiento de Arduino. `void loop () {...}`

En este bloque se debiera escribir todas aquellas instrucciones, ordenes, primitivas, comandos o funciones necesarias para que Arduino funcione según nuestro deseo.

Realmente, este bloque constituye un bucle infinito, Arduino, mientras este alimentada con energía, funcionara haciendo el programa loop una y otra vez. Iremos viendo cuales son estas funciones durante el desarrollo de estos apuntes.

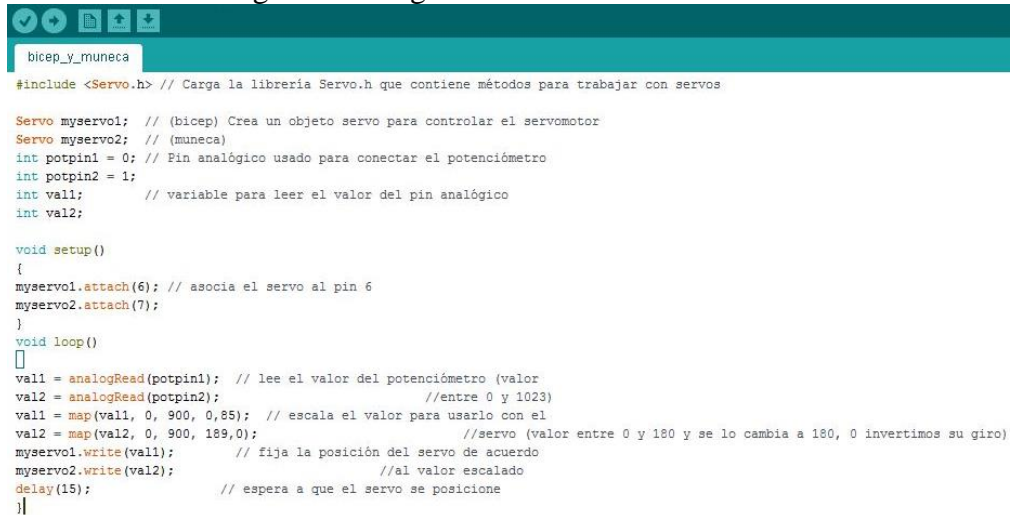
6.1.2 *Estructura empleada en la programación del brazo.* Se va a estructurar la programación según las tres partes deducidas anteriormente. Las programaciones de identifican por secciones.

- Programación movimiento dedos.

Como se describió anteriormente, se parte por la asignación de variables en este caso se tendría `int potpin=0` el cual es usado para conectar el potenciómetro y otra `int val;` variable para leer el valor del pin analógico donde está conectado el potenciómetro

Luego se va asignando los pines para las lecturas analógicas y definiendo los rangos de lecturas, por ultimo lo envía a leer datos al esclavo.

Figura 99. Programación movimiento dedos



```
bicep_y_muneca
#include <Servo.h> // Carga la librería Servo.h que contiene métodos para trabajar con servos

Servo myservo1; // (bicep) Crea un objeto servo para controlar el servomotor
Servo myservo2; // (muneca)
int potpin1 = 0; // Pin analógico usado para conectar el potenciómetro
int potpin2 = 1;
int val1; // variable para leer el valor del pin analógico
int val2;

void setup()
{
  myservo1.attach(6); // asocia el servo al pin 6
  myservo2.attach(7);
}

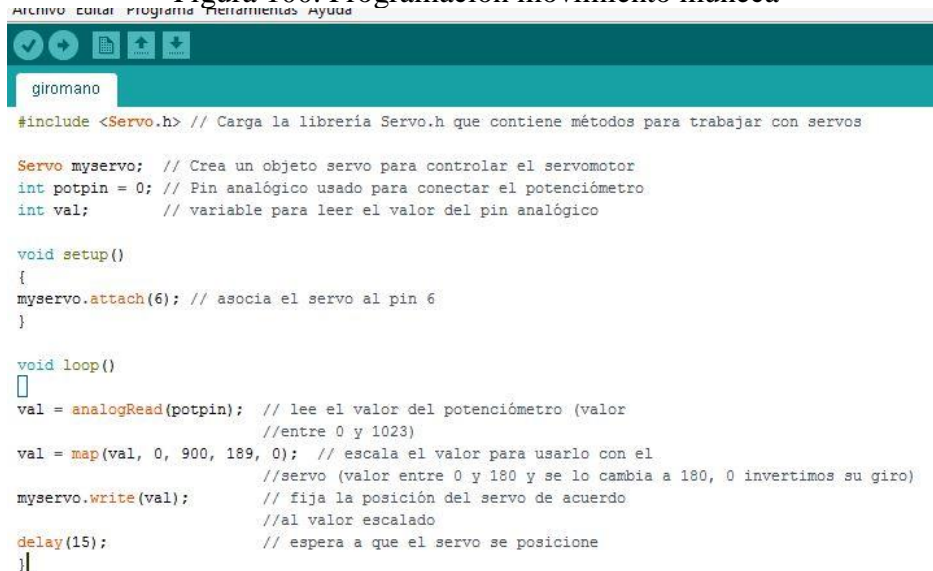
void loop()
{
  val1 = analogRead(potpin1); // lee el valor del potenciómetro (valor
  val2 = analogRead(potpin2); //entre 0 y 1023)
  val1 = map(val1, 0, 900, 0,85); // escala el valor para usarlo con el
  val2 = map(val2, 0, 900, 180,0); //servo (valor entre 0 y 180 y se lo cambia a 180, 0 invertimos su giro)
  myservo1.write(val1); // fija la posición del servo de acuerdo
  myservo2.write(val2); //al valor escalado
  delay(15); // espera a que el servo se posicione
}
```

Fuente: Autores

- **Programación movimiento muñeca**

Como se describió anteriormente, se parte por la asignación de variables en este caso se tendría `int potpin=0` el cual es usado para conectar el potenciómetro y otra `int val;` variable para leer el valor del pin analógico donde está conectado el potenciómetro prosigue con la asignación de pines en este caso pin 6 para la lectura de datos analógicos, se prosigue con la asignación de rango que ingresaran dichos datos para enviar a leer y escribir al esclavo.

Figura 100. Programación movimiento muñeca



```
giromano
#include <Servo.h> // Carga la librería Servo.h que contiene métodos para trabajar con servos

Servo myservo; // Crea un objeto servo para controlar el servomotor
int potpin = 0; // Pin analógico usado para conectar el potenciómetro
int val; // variable para leer el valor del pin analógico

void setup()
{
  myservo.attach(6); // asocia el servo al pin 6
}

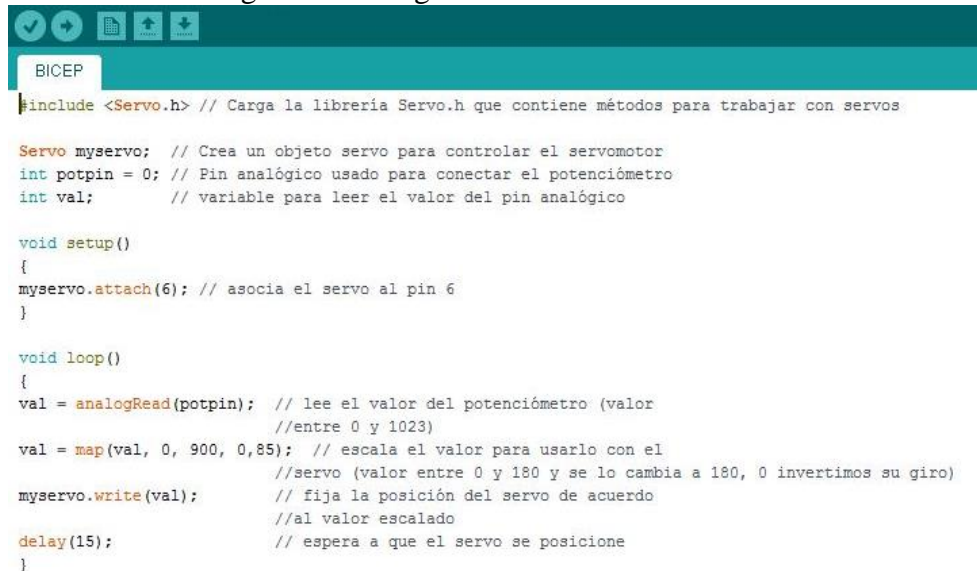
void loop()
{
  val = analogRead(potpin); // lee el valor del potenciómetro (valor
  //entre 0 y 1023)
  val = map(val, 0, 900, 180, 0); // escala el valor para usarlo con el
  //servo (valor entre 0 y 180 y se lo cambia a 180, 0 invertimos su giro)
  myservo.write(val); // fija la posición del servo de acuerdo
  //al valor escalado
  delay(15); // espera a que el servo se posicione
}
```

Fuente: Autores

- **Programación movimiento codo**

De igual manera a lo descrito anteriormente se definen variables, se asignan pines y se lee datos, se establece los rangos de lectura de datos analógicos para ser enviados hacia el esclavo para su lectura.

Figura 101. Programación movimiento codo



```

BICEP

#include <Servo.h> // Carga la librería Servo.h que contiene métodos para trabajar con servos

Servo myservo; // Crea un objeto servo para controlar el servomotor
int potpin = 0; // Pin analógico usado para conectar el potenciómetro
int val;        // variable para leer el valor del pin analógico

void setup()
{
  myservo.attach(6); // asocia el servo al pin 6
}

void loop()
{
  val = analogRead(potpin); // lee el valor del potenciómetro (valor
                           //entre 0 y 1023)
  val = map(val, 0, 900, 0,85); // escala el valor para usarlo con el
                           //servo (valor entre 0 y 180 y se lo cambia a 180, 0 invertimos su giro)
  myservo.write(val);        // fija la posición del servo de acuerdo
                           //al valor escalado
  delay(15);                 // espera a que el servo se posicione
}

```

Fuente: Autores

6.2 Configuración Máster - Esclavo Bluetooth

La configuración master – esclavo se refiere que uno de los Arduino Leonardo conectado a su módulo bluetooth respectivamente va a enviar datos hacia otro Arduino Leonardo con el mismo modulo para ser leídos y ejecutados.

Es decir que si se lee datos analógicos en el primer Arduino van a ser escritos en el segundo Arduino ese es el propósito de la conexión inalámbrica vía bluetooth.

6.2.1 Comunicación bluetooth. La comunicación bluetooth es una especificación tecnológica para redes inalámbricas que permite la transmisión de voz y datos entre distintos dispositivos mediante una radiofrecuencia segura (2,4 GHz).

Esta tecnología permite las comunicaciones sin cables ni conectores y la posibilidad de crear redes inalámbricas domésticas para sincronizar y compartir la información.

Figura 102. Master – Esclavo Bluetooth



Fuente: <http://goo.gl/QF0a2c>

6.2.2 Comandos attention. Los comandos AT son instrucciones codificadas que conforman un lenguaje de comunicación con un terminal módem, en este caso el módulo BT. Los comandos AT se denominan así por la abreviatura de attention.

El módulo Bluetooth se configura tanto como un dispositivo esclavo o un dispositivo maestro, a diferencia de los módulos que vienen por defecto en modo esclavo o en modo maestro, este módulo tendrá una ligera diferencia a la hora de enviar los comandos AT.

El módulo viene por defecto en modo esclavo, así que tanto el nombre como la contraseña están definidas. Por otro lado, si se desea el modo maestro, lo primero será ingresar a modo AT presionando un botón propio del módulo en caso de carecer del mismo se realiza un puente entre la última terminal y su anterior al momento de energizarlo para comprobar que se encuentra en dicho modo se usará el comando "AT\r\n", comando que nos indica que hay comunicación entre la tarjeta Arduino y el módulo bluetooth, para saber que hay comunicación se deberá visualizar una respuesta, en este caso: OK, vista desde el Monitor Serial.

Figura 103. Configuración comando AT



Fuente: Autores

Una vez que se confirma la comunicación en modo AT, se procede a enviar los comandos AT según a dicha aplicación.

AT+ROLE=0\r\n. Este comando define el modo en el que funcionará el modulo bluetooth, un 1 significa que se desea configurar en modo maestro, mientras un 0 indica modo esclavo. Como se desea configurar en modo esclavo usaremos "AT+ROLE=0\r\n"

AT+PSWD=4444\r\n. Este comando define una contraseña, como el módulo está configurado como esclavo, el comando indica la contraseña asociada al módulo.

6.2.3 *Configuración del módulo bluetooth Maestro-Esclavo mediante comandos AT.*
Se va a seguir los siguientes pasos para su configuración.

Pasos a seguir:

- El modulo no debe estar vinculado a ningún dispositivo.
- La forma visual de conocer el caso anterior. Led fijo --> Emparejado. Led intermitente --> Sin emparejar.
- Definir mediante la librería SoftwareSerial los nuevos pines TX,RX para el Arduino.

Conectar el TX del Módulo Bluetooth al RX del Arduino.

Conectar el RX del módulo Bluetooth al TX del Arduino.

- Realizar las conexiones tal como se muestra en el tutorial.

NOTA: Al momento de hacer las conexiones asegurarse que la tarjeta Arduino Uno NO ESTE ALIMENTADO.

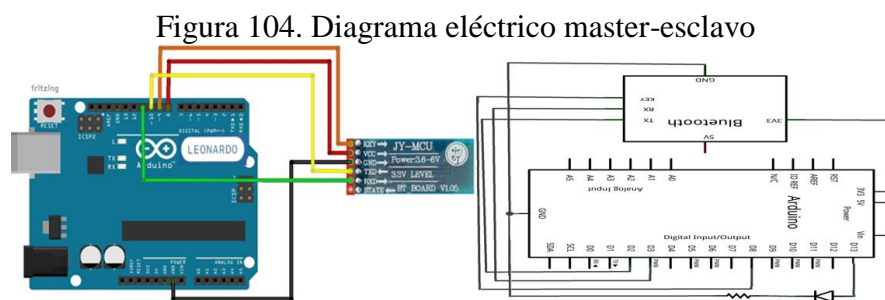
- Cargar el programa, seguidamente verifique que el led del módulo bluetooth comience a parpadear de manera rápida. Esto indica que entro en modo AT y que esta 9600 baudios, si por lo contrario el led parpadea de forma lenta indica que el modulo entro en modo AT a 38400 baudios.
- El presente código esta para 9600, así que recomendamos repetir el paso 5 y 6 hasta lograr que el LED parpadee de manera rápida.

- Probamos la comunicación con el modulo, mediante el comando de testeo: AT\r\n. Seguidamente se deberá visualizar la respuesta en el Monitor Serial. Se espera la respuesta OK. Si esta respuesta no aparece, verificar las conexiones.
- Verificar que los comandos AT son recibidos correctamente mediante el monitor serial (se debe esperar una respuesta OK, después de enviar los comandos AT).

6.2.4 *Conexión física del master- esclavo bluetooth.* Para realizar la conexión física del sistema master – esclavo se necesita de los siguientes elementos.

- Arduino Leonardo
- Modulo bluetooth HC-05
- Cables jumper

6.2.4.1 *Diagrama eléctrico del master-esclavo.* Para poder realizar una adecuada conexión se realiza un diagrama guía ya probado en un software para eliminar errores.



Fuente: <http://goo.gl/QF0a2c>

6.2.4.2 *Conexión física del master-esclavo.* Una vez realizado y probado el circuito se procede a su conexión física de los elementos.



Fuente: Autores

6.2.5 *Programación realizada para la comunicación master – esclavo.* Se realizó una programación para cargar al Arduino Esclavo con el motivo de que logre leer los datos enviados desde el Arduino Master.

Figura 106. Programacion bluetooth

```
led_blue
#include <SoftwareSerial.h>
#include <Servo.h>

Servo ser1;
Servo ser2;
Servo ser3;
Servo ser4;
Servo ser5;

#define rxPin 10
#define txPin 11

SoftwareSerial miPuertoSerie = SoftwareSerial(rxPin, txPin);

int pos1,pos2,pos3,pos4,pos5;
char dato;
void setup()
{
  ser1.attach(2);
  ser2.attach(7);
  ser3.attach(3);
  ser4.attach(4);
  ser5.attach(5);
  miPuertoSerie.begin(9600);
  Serial.begin(9600);
}
```

Fuente: Autores

Figura 107. Programacion bluetooth

```
led_blue
void loop()
{
  leer();
  if (dato=='a')
  {
    miPuertoSerie.write("a");
    leer();
    ser1.write((dato-16)*5);
  }

  if (dato=='b')
  {
    miPuertoSerie.write("b");
    leer();
    ser2.write(180-(dato-16)*5);
  }

  if (dato=='c')
  {
    miPuertoSerie.write("c");
    leer();
    ser3.write(180-(dato-16)*5);
  }
}
```

Fuente: Autores

Figura 108. Programacion bluetooth

```

if (dato=='d')
{
  miPuertoSerie.write("d");
  leer();
  ser4.write(180-(dato-16)*5);
}

if (dato=='e')
{
  miPuertoSerie.write("e");
  leer();
  ser5.write((dato-16)*5);
}
}

void leer()
{
  dato=-1;
  while(dato<0)
  {
    dato=miPuertoSerie.read();
  }
}

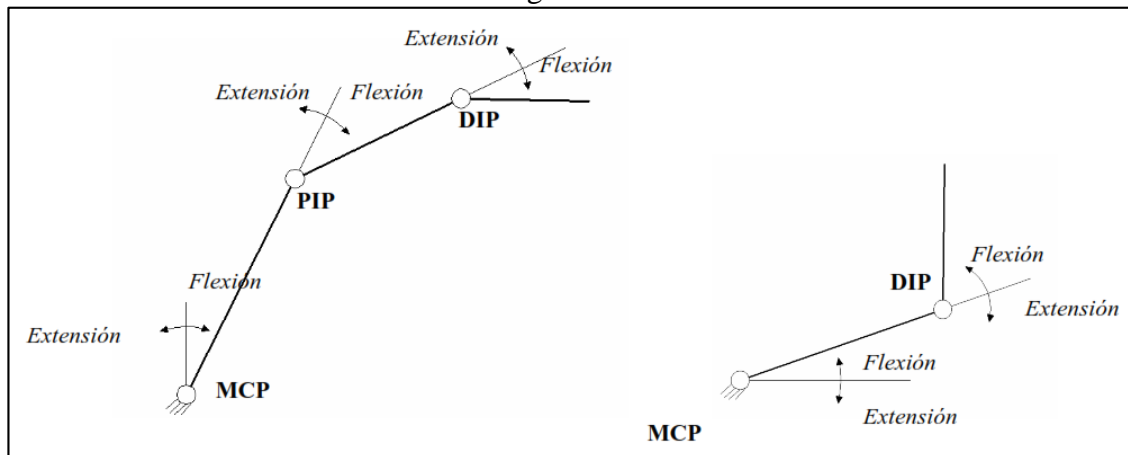
```

Fuente: Autores

6.3 Similitud de movimientos

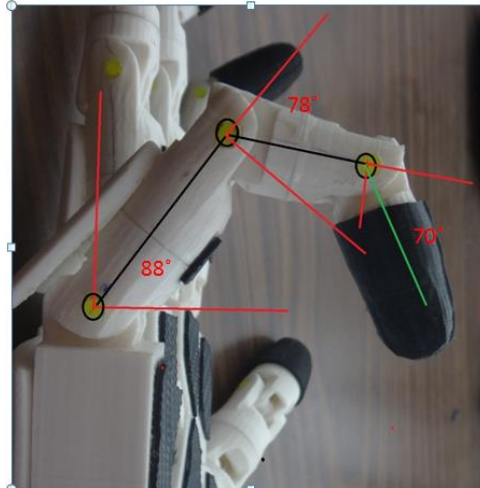
Se tomaron las respectivas mediciones de los ángulos en los dedos del prototipo, se tomó como referencia la unión de las diferentes articulaciones, en la figura se muestra dos movimientos: extensión y flexión con tres ángulos formados en las articulaciones: MCP (Metacarpofalángica), PIP (Interfalángica proximal) y DIP (Interfalángica distal), en el caso del dedo pulgar tendrá dos tipos de articulaciones MCP y DIP.

Figura 109. Similitud



Fuente: Autores

Figura 110. Ángulos medidos en el dedo índice.



Fuente: Autores.

Las mediciones se desarrollaron con el máximo ángulo en las dos diferentes posiciones, el resultado de estas mediciones se muestran en la tabla.

Tabla 34. Rango de movimiento de las articulaciones de la mano

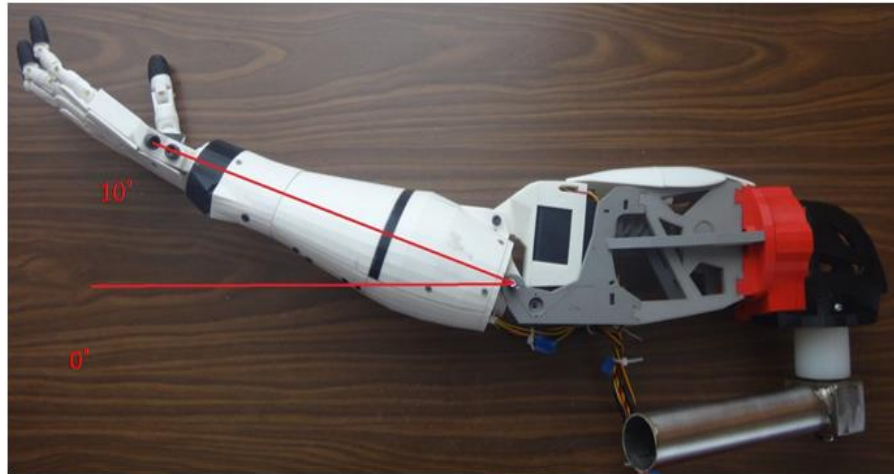
Dedo	Articulación	Flexión [°]	Extensión [°]
Meñique	Interfalangica distal (DIP)	60	10
	Interfalangica proximal (PIP)	73	10
	Metacarpofalangica (MCP)	80	10
Anular	Interfalangica distal (DIP)	60	12
	Interfalangica proximal (PIP)	70	12
	Metacarpofalangica (MCP)	80	10
Medio	Interfalangica distal (DIP)	60	10
	Interfalangica proximal (PIP)	75	7
	Metacarpofalangica (MCP)	85	9
Índice	Interfalangica distal (DIP)	70	10
	Interfalangica proximal (PIP)	78	8
	Metacarpofalangica (MCP)	88	7
Pulgar	Metacarpofalangica (MCP)	40	0
	Interfalangica distal (DIP)	55	0

Fuente: Autores.

Con referencia a los dedos humanos los dedos del brazo robótico son muy similares esto es fundamental para el agarre y manipulación de objetos y sustancias toxicas en procesos de alto riesgo dentro de empresas, además incrementa la precisión en diferentes trabajos con exposiciones a diferentes riesgos.

6.3.1 *Posiciones del brazo inalámbrico.* En su posición inicial el brazo no está completamente recto, tiene una ligera inclinación de 10°

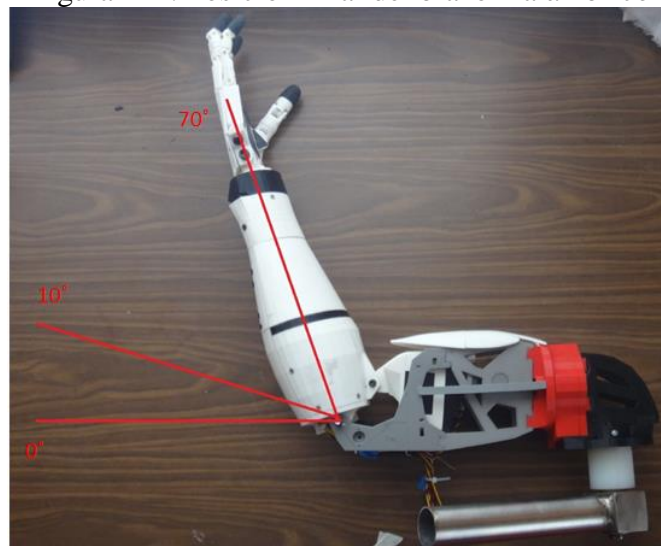
Figura 111. Posición inicial



Fuente: Autores

6.3.1.1 *Posición final.* La posición del ángulo del brazo robótico tiene un valor máximo de 60° en su posición final, esta posición está definida por el servomotor y el tornillo sin fin ubicado en el codo.

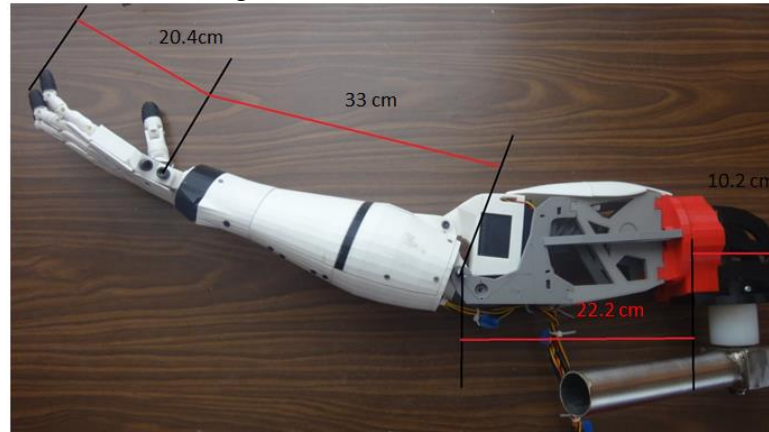
Figura 112. Posición final del brazo inalámbrico



Fuente: Autores

6.3.1.2 *Alcance máximo.* El alcance máximo hace referencia a las medidas del centro del hombro hasta el final de los dedos, el movimiento del brazo robótico será vertical. Con las mediciones realizadas se establece un alcance máximo de 83.2 cm.

Figura 113. Alcance maximo



Fuente: Autores

6.4 Pruebas de sujeción

Las pruebas realizadas en el brazo inalámbrico sirven para evaluar su funcionalidad y efectividad al ejecutar varias acciones como: tomar objetos, girar la muñeca y facilidad en acciones básicas de manipulación, las pruebas fueron realizadas con ayuda de un voluntario con un nivel de entrenamiento medio como se muestra en la figura.

Figura 114. Pruebas



Fuente: Autores

El resultado se muestra en la tabla, se hicieron 5 intentos para evaluar su efectividad. La efectividad y el número de intentos fallidos se calcularan con la siguiente formula:

$$\% \text{ Efectividad} = \frac{\text{intentos exitosos}}{\# \text{ de intentos}} \times 100 \quad (17)$$

$$\text{Intentos Fallidos} = \text{intentos exitosos} - \# \text{ de intentos}$$

Tabla 35. Resultado de pruebas

Prueba	Descripción	Intentos Exitosos	Intentos Fallidos	Núm. de Intentos	Efectividad [%]
1	Cerrar la mano	5	0	5	100
2	Abrir la mano	5	0	5	100
3	Girar muñeca	5	0	5	100
4	Tomar una manzana	4	1	5	80
5	Tomar una esfera	3	2	5	60
6	Tomar un bolígrafo	4	1	5	80
7	Tomar una tarjeta	4	1	5	80
8	Tomar una caja pequeña (caja de fosforo) o similar	4	1	5	80
9	Tomar una botella	4	1	5	80
10	Tomar una botella, girar muñeca y soltar	3	2	5	60
11	Tomar un vaso, girar muñeca y soltar	4	1	5	80
12	Tomar un vaso , abrir la mano y soltar	4	1	5	80

Fuente: Autores

Figura 115. Pruebas



Fuente: Autores

Según los resultados mostrados en la tabla anterior, se pudo determinar que el brazo robótico responde con gran efectividad a las pruebas sometidas con un porcentaje de efectividad total de 81.6%.

Las pruebas demuestran que mientras el voluntario va adquiriendo más práctica los resultados son cada vez mejores.

El voluntario considera al prototipo como un avance muy importante dentro de las empresas en la manipulación de sustancias peligrosas, en lo estético el voluntario manifiesta que el prototipo tiene un diseño y forma futurista con muy alta estética.

En cuanto a lo ergonómico considera que el guante es muy cómodo por su composición y su peso es tolerable en tiempos prolongados de uso.

6.5 Pruebas de seguridad

Las pruebas de seguridad se enfocan en evaluar y asegurar que el brazo inalámbrico trabaje sin poner en peligro a los operarios que lo usen.

Esta evaluación esta específicamente relacionada con la protección de los operarios a posibles descargas eléctricas provenientes del circuito electrónico.

El circuito electrónico del brazo robótico maneja voltajes muy bajos entre 5v y 6v que no representan un problema en consecuencia el uso del prototipo es seguro.

Otro aspecto de seguridad se relaciona con la portabilidad del guante, el operario puede manipular el guante cómodamente sin embargo en tiempos prolongados y dependiendo de la postura y de la condición física del operario puede causar fatiga, se recomienda quitarse el guante cuando no se utilice el dispositivo para evitar fatiga.

6.6 Indicaciones de utilización del prototipo

Las indicaciones tiene por objetivo guiar al usuario de forma correcta sobre el uso del prototipo, el principio de funcionamiento se basa en el movimiento de un brazo humano, su estructura está compuesta por varios componentes electrónicos y mecánicos.

Estos elementos en concreto los componentes electrónicos son frágiles y una mala manipulación puede causar daño y poner en riesgo el funcionamiento adecuado del prototipo.

6.6.1 *Indicaciones de seguridad.* El prototipo tiene una fuente de energía relativamente baja, no presenta un alto riesgo para el usuario que manipule el brazo inalámbrico, sin embargo se colocara la fuente de energía con los terminales de salida completamente aislados, para esto el circuito electrónico se colocó dentro una base de tela que se colocara alrededor del brazo evitando así cualquier tipo de contacto con el usuario.

6.6.2 *Indicaciones generales.* El brazo se colocara fijamente en la base diseñada para este fin, cualquier movimiento de la base puede alterar la precisión en los movimientos.

No se levantarán pesos que excedan la cantidad calculada, el sobreesfuerzo puede afectar a los componentes internos del servomotor ubicado en el eje del codo.

Se tendrá extremo cuidado para colocarse el guante sensorial, los sensores ubicados en cada uno de los dedos son sensibles y una mala manipulación puede causar daños de descalibración, esto afecta notablemente en el grado de respuesta del brazo inalámbrico.

El prototipo se colocara en ambientes propicios para su funcionamiento, un ambiente con condiciones inadecuadas afectaría a los componentes mecánicos y electrónicos.

Comprobar que las cubiertas y tapas del prototipo estén completamente cerradas para evitar contacto con polvo y otras sustancias que puedan afectar la movilidad de los servomotores ubicados dentro del antebrazo.

Antes de realizar pruebas con el prototipo se deberán verificar todas las conexiones electrónicas, una vez realizado este procedimiento el usuario también verificará cada uno de los movimientos del brazo (dedos, antebrazo y giro de la muñeca).

Se deberá tener un archivo de respaldo con las piezas diseñadas para poder reemplazar piezas que puedan sufrir desgastes y alteren el funcionamiento del brazo. Comprobar que todos los elementos mecánicos estén fijos a la estructura del prototipo.

6.6.3 *Descripción de funcionamiento.* El funcionamiento del prototipo inicia con todos los elementos electrónicos conectados correctamente a su fuente de energía correspondiente, el usuario se colocara el guante sensorizado para el movimiento de los dedos con cada movimiento el sensor Flex ubicado en cada uno de los dedos del guante enviara una señal mediante modulación por anchos de pulso o PWM (Pulse Width Modulation)

La modulación por ancho de pulso modifica la posición del servomotor de acuerdo al ancho de pulso enviado.

Una vez digitalizados los datos de posición estos son procesados, almacenados y actualizados continuamente y se entabla la comunicación vía bluetooth, para simular el movimiento de la mano en tiempo real.

Figura 116. Descripción



Fuente: Autores

6.6.4 *Recomendaciones para su uso.* Antes del uso del prototipo el encargado del laboratorio donde se encuentra el brazo inalámbrico dará una breve inducción sobre el uso y alcance de este, realizara un breve reconocimiento sobre los componentes electrónicos y mecánicos que integran el prototipo.

En cada uso del prototipo se verificaran todos los componentes con el fin de evitar pérdidas, todos los componentes electrónicos se almacenaran en lugares propicios para evitar su deterioro.

Se realizara periódicamente mantenimiento especialmente a los componentes mecánicos en los sistemas de movimiento (tornillo de potencia, tornillos sin fin, engranajes) estos componentes se lubricaran periódicamente.

6.7 Costos y financiamiento

Cuando se trata de innovaciones tecnológicas y especialmente en creaciones de prototipos siempre implicara un costo, los autores de este proyecto cubrieron completamente con el financiamiento; por otro lado la investigación para construir un medio de seguridad de un trabajador es una inversión tanto a nivel económico como social, sin embargo es necesario evaluar el costo total del proyecto, a continuación se muestran los detalles de los costos del prototipo.

6.7.1 Costos directos

Tabla 36. Costos directos parte eléctrica-electrónica

Parte Eléctrica - Electrónica			
Cant.	Descripción	Precio uni. [USD]	Total [USD]
4	Arduino Leonardo R3	60	240
4	Bluetooth Hc-05	25	100
5	Servomotores HITEC HS-485	22	110
1	Servomotor MG996	34	34
3	Servomotores Hitec HS-805BB	120	360
10	Galgas sensor flex dedos 2.2	13	130
2	Giróscopo 4 ejes	35	70
2	Galgas sensor circular	25	50
2	Actuador galga circular	10	20
4	Placas y elementos electrónicos	68	272
2	Cable multifilar de red 20 m	24	48
4	Batería 6 V 4,5 A	25	100
1	Batería 6v Lipo	100	100
Total			1634

Fuente: Autores

Tabla 37. Costos directos parte mecánica

Parte Mecánica		
Cant.	Descripción	Total [USD]
1	Mano de Obra	1000
1	Impresión 3D de piezas	1600
Total		2600

Fuente: Autores

6.7.2 Costos indirectos

Tabla 38. Costos indirectos

Descripción	Total [USD]
Mantenimiento Impresora	150
Transporte Materiales	80
Servicio Internet	30
Equipos y Herramientas	300
Total	560

Fuente: Autores

6.7.3 *Costo total*

Tabla 39. Costo total

Costos	Valor [USD]
Directos	4234
Indirectos	560
Total	4794

Fuente: Autores

El costo total del prototipo es de 4794 USD.

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

El brazo inalámbrico es de gran utilidad dentro de la industria ecuatoriana, evitando los daños en los trabajadores que pueden ocasionar los procesos industriales de alto riesgo. Dicho brazo es un medio de protección porque el operario no se encuentra en contacto directo con el proceso pues el operario se localiza a una distancia máxima de veinte metros.

Los parámetros de diseño de cada uno de los componentes del brazo robótico se los realiza con ayuda del software SolidWorks, simulando las tolerancias específicas y de esta manera garantizar un ensamble adecuado.

Considerando los resultados del análisis cinemático y dinámico la reproducción de movimientos es similar al brazo humano tomando en cuenta todos los parámetros analizados en los dedos, muñeca y codo, con la ayuda de elementos electrónicos específicos para cada reproducción.

La diferencia entre los resultados de las fuerzas calculadas y las reales son de un 9,7 % debido a las perdidas existentes tanto eléctricas por la caída de tensión, como mecánicas por fricción de los componentes del brazo.

7.2 Recomendaciones

Es necesario diseñar y construir el brazo robótico industrial de acuerdo a las condiciones físicas de trabajo en el que se va a desempeñar, de acuerdo a estos parámetros se considerara la selección de los materiales y componentes.

Ubicar de forma correcta el brazo robótico industrial con respecto al trabajo de manipulación a realizar en procesos industriales de alto riesgo para obtener un mejor resultado.

Asegurar que la fuente de alimentación proporcione el voltaje adecuado sin sobrepasar los 6 Voltios DC.

Verificar periódicamente los componentes electrónicos y mecánicos especialmente la tensión de los cables, una mala tensión podría limitar el agarre de objetos.

BIBLIOGRAFIA

- APPOLD, H, y otros. 1985.** *Tecnología de lo Metales*. Barcelona : REVERTÉ, 1985.
- DERRICKSON, Gerard J.Tortora/ Bryan. 2006.** *Principios de Anatomía y fisiología*. Mexico : Médica Panamericana., 2006.
- ESTRELLA, Edison. 2014.** Diseño y Contrucción de un robot para la manipuación de explosivos. TESIS . [En línea] Octubre de 2014. [Citado el: 1 de Agosto de 2015.] <http://repositorio.pucesa.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/918/1/75566.pdf>.
- HARBOR, PHILLIPS C. & R. 1996.** *Feedback Control Systems*. New Jersey : Prentice Hall, 1996.
- MILLÁN, Simón. 2010.** *Procedimientos de Mecanizado*. Madrid : Paraninfo S.A, 2010.
- MIRRALLES MARRERO, Rodrigo C. 2007.** *Biomecánica clínica de las patologías del aparato locomotor*. España : Masson, 2007.
- OLLERO, A. 2001.** *Robótica,manipuladores y robots móviles*. Barcelona : MarcomboBoixareu., 2001.
- P, Suarez R y Grosch. 2005.** Academia. *Academia*. [En línea] 2005. [Citado el: 12 de 08 de 2015.] http://www.academia.edu/12513070/MANO_MEC%C3%81NICA_MA-I.
- STONE, H. 1986.** *Kinematic Modeling,identification,and control of robotic manipulators*. . Pennsylvania,Estados Unidos de America. : Pittsburgh., 1986.
- T.E., Yum.Y.Guilespie. 1978.** *Kinematic investigation of Normal MCp joint*. s.l. : Spragne, 1978.
- TAYLOR G.L., Schwartz R.J.,. 1955.** "The anatomy and mechanics of the human Hand" Artificial Limbs. 1955.